UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DO
AQÜÍFERO BOTUCATU, NO SETOR MÉDIO DA
BACIA HIDROGRÁFICA MOGI-PARDO**

André Luís Invernizzi

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO
2001

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DO AQÜÍFERO
BOTUCATU, NO SETOR MÉDIO DA BACIA HIDROGRÁFICA MOGI-
PARDO**

ANDRÉ LUÍS INVERNIZZI

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

Nome

Assinatura

Presidente: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

Examinadores: Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt

Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

SÃO PAULO
2001

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DO
AQÜÍFERO BOTUCATU, NO SETOR MÉDIO DA
BACIA HIDROGRÁFICA MOGI-PARDO**

André Luís Invernizzi

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

DEDALUS - Acervo - IGC

30900009952

SÃO PAULO
2001

Em memória do meu pai
Ademar Invernizzi

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio da CPRM (Serviço Geológico do Brasil) que efetuou a coleta e análise das amostras de água. Agradeço especialmente ao Geólogo Takarashi pelas sugestões, discussões e pela ajuda na utilização do programa GWW.

Expresso meus sinceros agradecimentos à professora Dra Sonia Maria Barros de Oliveira pela orientação, dedicação e pelas contribuições no conteúdo e na forma do texto.

Agradeço à Marta (Buli) pelas sugestões, correções, motivações, companheirismo, carinho, viagens....

À minha família que mesmo de longe me deu força e apoio em mais essa fase da minha vida.

Aos colegas de pós-graduação por compartilharem as experiências adquiridas nessa etapa de nossa formação. Agradeço de coração aos amigos Renato, Liliane e Gilberto pela disposição em solucionar os problemas encontrados, principalmente em relação a informática.

Aos colegas João e Tania (Kika) pela ajuda na correção do abstract.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de mestrado.

Finalmente ao pessoal do Grupo Assalto que com certeza colaborou para a conclusão deste trabalho.

Saudações Geológicas

ÍNDICE GERAL

I - INTRODUÇÃO.....	1
II - CARACTERÍSTICAS DA ÁREA.....	6
1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	6
2 – CLIMA.....	6
3 – GEOMORFOLOGIA E SOLOS.....	6
4 – GEOLOGIA REGIONAL.....	8
4.1. Formação Pirambóia.....	10
4.2. Formação Botucatu.....	11
4.3. Formação Serra Geral.....	11
5 – HIDROGEOLOGIA.....	12
III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
1 – MATERIAIS.....	13
1.1. Seleção dos poços.....	13
1.2. Coleta e preservação de amostras.....	13
1.3. Medidas dos parâmetros físico-químicos em campo.....	14
2 – MÉTODOS.....	14
2.1. Técnicas analíticas.....	14
2.2. Tratamento dos dados.....	18
IV - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	25
1 – MAPA POTENCIOMÉTRICO.....	25
2 – COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS.....	25
2.1. Diagramas <i>Box & Whisker</i>	29
2.2. Histogramas de frequência.....	33
3 – COMPORTAMENTO ESPACIAL DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS, TEORES DOS ÍONS E RELAÇÕES IÔNICAS.....	39
3.1. Comportamento espacial dos parâmetros físico-químicos.....	39
3.2. Comportamento espacial dos íons maiores.....	43
3.3. Comportamento espacial das relações iônicas.....	51
4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA.....	56
4.1. Correlações.....	56
4.2. Análise fatorial.....	56
4.3. Análise de agrupamento.....	66
4.4. Caracterização dos três grupos de água identificados pela análise estatística.....	68
5 – DIAGRAMAS DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS.....	73
5.1. Diagramas de Stiff.....	73
5.2. Diagramas de Piper.....	73

6 – CÁLCULO DOS EQUILÍBRIOS.....	78
6.1. Diagramas de estabilidade dos aluminossilicatos.....	78
6.2. Cálculos dos índices de saturação.....	83
7 – EVOLUÇÃO HIDROGEOQUÍMICA.....	84
V - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
ANEXO.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II. 1 -	Mapa de localização dos municípios pertencentes à área de estudo	7
Figura II.2 -	Carta geológica (IPT, 1981).....	9
Figura IV.1 -	Curvas de isovalores de nível estático aparente, representando o fluxo das águas subterrâneas do aquífero Botucatu, dentro da área de estudo.....	26
Figura IV.2a -	Diagrama Box & Whisker, representando os teores de B^{3+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Mn^{2+} , Sr^{2+} , Zn^{2+} para o conjunto de 38 amostras.....	30
Figura IV.2b -	Diagrama Box & Whisker, representando os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , Na^+ , K^+ para o conjunto de 38 amostras.....	30
Figura IV.2c -	Diagrama Box & Whisker, representando os teores de F^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , HCO_3^- e CO_3^{2-} para o conjunto de 38 amostras.....	31
Figura IV.2d -	Diagrama Box & Whisker, representando os valores de pH para o conjunto de 38 amostras.....	31
Figura IV.2e -	Diagrama Box & Whisker, representando os valores de temperatura em $^{\circ}C$ para o conjunto de 38 amostras.....	32
Figura IV.2f -	Diagrama Box & Whisker, representando os valores de dureza expressos em mg/L de $CaCO_3$ para o conjunto de 38 amostras.....	32
Figura IV.2g -	Diagrama Box & Whisker, representando os valores da condutividade em uS/cm para o conjunto de 38 amostras.....	33
Figura IV.3a -	Histogramas de frequência dos teores obtidos para B^{3+} , Ba^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Sr^{2+} , Mn^{2+} , em 38 amostras.....	35
Figura IV.3b -	Histogramas de frequência dos teores obtidos para SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , em 38 amostras.....	36
Figura IV.3c -	- Histogramas de frequência dos teores obtidos para F^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , em 38 amostras.....	37
Figura IV.3d -	Histogramas de frequência dos valores obtidos para pH, temperatura, dureza e condutividade, em 38 amostras.....	38

Figura IV.4 -	Comportamento espacial dos valores da temperatura em °C..	39
Figura IV.5 -	Comportamento espacial dos valores de pH.....	40
Figura IV.6 -	Comportamento espacial dos valores de condutividades em uS/cm.....	41
Figura IV.7 -	Comportamento espacial dos valores de dureza em mg/L de CaCO ₃	42
Figura IV.8 -	Comportamento espacial dos teores de sódio em mg/L.....	43
Figura IV.9 -	Comportamento espacial dos teores de potássio em mg/L.....	44
Figura IV.10 -	Comportamento espacial dos teores de cálcio em mg/L.....	45
Figura IV.11 -	Comportamento espacial dos teores de magnésio em mg/L....	46
Figura IV.12 -	Comportamento espacial dos teores do bicarbonato em mg/L	47
Figura IV.13 -	Comportamento espacial dos teores de sulfato em mg/L.....	48
Figura IV.14 -	Comportamento espacial dos teores de cloreto em mg/L.....	49
Figura IV.15 -	Comportamento espacial dos teores de nitrato em mg/L.....	50
Figura IV.16 -	Comportamento espacial da relação iônica rK^+/rNa^+	53
Figura IV.17 -	Comportamento espacial da relação iônica $rCl^-/rHCO_3^-$	54
Figura IV.18 -	Comportamento espacial da relação iônica rSO_4^{2-}/Cl^-	55
Figura IV.19 -	Diagrama representando os fatores e seus respectivos autovalores.....	58
Figura IV.20a -	Diagrama Fator 1 <i>versus</i> Fator 2	61
Figura IV.20b -	Diagrama Fator 2 <i>versus</i> Fator 3.....	61
Figura IV.21a -	Diagrama Fator 1 x Fator 2.....	62
Figura IV.21b -	Diagrama Fator 1 <i>versus</i> Fator 3.....	63
Figura IV.22a -	Distribuição espacial dos valores de Fator 1.....	65
Figura IV.22b -	Distribuição espacial dos valores de Fator 2.....	66
Figura IV.23a -	Dendograma representando as amostras agrupadas na análise <i>cluster</i> considerando-se todos os íons analisados.....	67
Figura IV.23b -	Dendograma representando as amostras agrupadas na análise <i>cluster</i> considerando-se todos os íons analisados, exceto HCO ₃ ⁻	67
Figura IV.24 -	Representação no mapa geológico dos 3 Grupos identificados pela análise estatística.....	71
Figura IV.25a	Diagramas de Stiff construídos para as amostras do Grupo 1	74
Figura IV.25b	Diagramas de Stiff construídos para as amostras do Grupo 2	75
Figura IV.25c	Diagramas de Stiff construídos para as amostras do Grupo 3	76
Figura IV.26	Diagrama de Piper representando os três grupos identificados pela análise estatística.....	77
Figura IV.27a -	Diagrama de equilíbrio para o sistema Na-Al-Si-H ₂ O, com os três grupos de água.....	80
Figura IV.27b -	Diagrama de equilíbrio para o sistema K-Al-Si-H ₂ O, com os três grupos de água.....	81
Figura IV.27c -	Diagrama de equilíbrio para o sistema Ca-Al-Si-H ₂ O, com os três grupos de água.....	82
Figura IV.28a -	Perfil sudeste-noroeste representando os poços 17, 46, 9 e 14.....	86

Figura IV.28b	Perfil sudeste-noroeste representando os poços 22, 29, 24, 2 e 1.....	87
Figura IV.28c	Perfil sudeste-noroeste representando os poços 20, 21, 27 e 19.....	88
Figura IV.28d	Perfil leste-este representando os poços 47, 45, 42 e 14.....	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela IV.1 -	Teores em mg/L dos íons analisados e valores de pH, dureza em mg/L de CaCO_3 , temperatura em $^{\circ}\text{C}$ e condutividade em $\mu\text{S/cm}$	27
Tabela IV.2 -	Médias, medianas, desvios-padrão, teores mínimos e máximos dos cátions e ânions (mg/L), e parâmetros físico-químicos (pH, temperatura em $^{\circ}\text{C}$, dureza em mg/L de CaCO_3 , e condutividade em $\mu\text{S/cm}$) das 38 amostras analisadas. Na coluna da direita está assinalado n = número de amostras abaixo do limite de detecção.....	28
Tabela IV.3 -	Faixa de teores freqüentemente encontrada nas águas subterrâneas e os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 1469 do Ministério da Saúde, de 29 de dezembro de 2000.....	29
Tabela IV.4 -	Teores dos principais íons em meq/L, balanço iônico e relações iônicas.....	52
Tabela IV.5a -	Matriz de correlação entre as variáveis, calculadas a partir dos dados originais.....	57
Tabela IV.5b -	Matriz representando apenas os íons que possuem correlações positivas entre si.....	57
Tabela IV.6 -	Fatores extraídos da matriz de correlação e seus respectivos autovalores, junto com a proporção da variância explicada por cada fator.....	58
Tabela IV.7 -	Cargas das variáveis no modelo de três fatores, sem rotação.....	59
Tabela IV.8 -	Cargas das variáveis no modelo de três fatores com rotação varimax.....	60
Tabela IV.9 -	Valores dos scores calculados para as 38 amostras.....	62
Tabela IV.10 -	Características dos grupos identificados pela análise fatorial e pela análise de agrupamento.....	70
Tabela IV.11 -	Valores dos logaritmos das relações molares utilizados na construção dos diagramas.....	79
Tabela IV.12 -	Índices de saturação para calcita, dolomita, calcedônia, fluorita, magnesita e quartzo, calculados através do programa MINTEQA.....	83

RESUMO

Nesse estudo efetuou-se um detalhamento do comportamento hidrogeoquímico do sistema aquífero Botucatu, composto pelas formações Pirambóia e Botucatu, na porção média da bacia hidrográfica Mogi-Pardo, noroeste do Estado de São Paulo. A região estudada abrange porções do aquífero livre a leste, e do aquífero confinado a oeste, o que possibilitou estabelecer a evolução hidrogeoquímica das águas no sentido do fluxo, a partir da área de recarga.

Análises multivariadas foram realizadas com os dados químicos e físico-químicos de 38 amostras de água do aquífero, permitindo identificar três grupos de água com características físico-químicas e químicas distintas.

O Grupo 1 ocorre na região livre do aquífero e é composto por águas bicarbonatadas cálcico-magnesianas, bem diluídas, condutividade < 100 uS/cm, e pH ácido. O Grupo 2 ocorre na porção confinada, é formado por águas bicarbonatadas cálcicas com condutividade entre 130 e 250 uS/cm e pH variando de neutro a levemente alcalino. O Grupo 3 engloba as águas bicarbonatadas sódicas com pH alcalino e condutividade entre 170 e 318 uS/cm, ocorre na região noroeste da área, na porção confinada, e no extremo leste da área, região de afloramento da Formação Pirambóia.

As águas do Grupo 1, ao percolarem as rochas do aquífero no sentido geral do fluxo (leste-oeste), dissolvem os minerais e se enriquecem em vários íons assumindo as características do Grupo 2. As águas do Grupo 3 diferem das águas dos outros dois grupos, especialmente em relação ao teor de sódio. Essa característica pode ser resultante ao mesmo tempo do enriquecimento salino normal no sentido do fluxo, e de uma possível assinatura geoquímica das águas da Formação Pirambóia, a qual se expressa claramente em poços localizados no extremo leste da área, que coletam águas provenientes exclusivamente da Formação Pirambóia e também em poços localizados no noroeste da área, que coletam águas tanto da Formação Botucatu quanto da Formação Pirambóia.

ABSTRACT

The present work is concerned with the hydrogeochemical behavior of the Botucatu Aquifer (Guarani Aquifer System) in the medium portion of the Mogi-Pardo rivers basin, northwestern region of the São Paulo state, Brazil. This aquifer system is composed of the Botucatu and Pirambóia formations, capped a thick succession of volcanic rocks of the Serra Geral formation. The focused area includes unconfined portions of the aquifer system to the east, and confined portions to the west, making it possible to analyze the hydrogeochemical evolution of the waters from the recharge area, parallel to the flow direction.

The results of physicochemical and chemical analysis from 38 water samples were submitted to factorial and cluster analysis, leading to the characterization of three sample groups which represent three different types of water.

Group 1 is related to the unconfined portion of the aquifer and is characterized by diluted water with conductivity of less than 100 uS/cm and acid pH. Group 2 corresponds to the confined portion of the aquifer, composed of calcium bicarbonated water with conductivity between 130 and 250 uS/cm and pH varying from slightly neutral to alkaline. Group 3 is constituted by sodium bicarbonated water from both unconfined and confined portions of the aquifer, with conductivity between 170 and 318 uS/cm and alkaline pH .

Group 2 water is interpreted to be the product of the evolution of Group 1 water as it percolates through the aquifer from east to west, dissolving rock minerals. Group 3 water differs from the two other groups, specially in the sodium concentration. Its composition is a result of saline enrichment parallel to the direction of flow and possibly is also a function of the geochemical signature of Pirambóia formation's water. This possibility is expressed clearly by some wells, located in the east of the area, that collect water exclusively from the Pirambóia formation, and by others in the northwestern portion of the area, which collect water from both the Botucatu and Pirambóia formations.

I - INTRODUÇÃO

As características químicas e físicas do aquífero Botucatu têm sido objeto de estudo de vários autores, principalmente no Estado de São Paulo. Em 1974, o DAEE realizou um estudo hidrogeológico na região administrativa de Ribeirão Preto em uma área de 35.000 km², compreendida entre os meridianos 47° 00' e 49° 15' W e entre os paralelos 20° 00' e 22° 15', sendo limitada ao norte pelo rio Grande, ao sul pelo rio Tietê e cortada na parte central pelos rios Pardo e Mogi-Guaçu. Essa área abrangeu 88 municípios que foram agrupados em 7 sub-regiões. Nesse estudo constatou-se que a direção do movimento do fluxo das águas subterrâneas é de leste para oeste no sentido do mergulho das rochas do aquífero. O pH varia de 4,3 a 8,0 e o conteúdo de sólidos totais dissolvidos varia de 22,0 a 150,0 mg/L, sendo que ambos aumentam no sentido do fluxo. A concentração de sais é baixa nas áreas de afloramento do aquífero, devido à maior influência das chuvas que percolam por solos permeáveis. Na porção confinada do aquífero, a concentração de sais aumenta no sentido do movimento do fluxo, atingindo os mais altos teores nas partes confinadas mais profundas, devido ao tempo de contato prolongado entre as águas e as rochas do aquífero. A relação rMg^{2+}/rCa^{2+} apresenta valores entre 0 e 1,66 que são inversamente proporcionais à concentração dos sais, e diminuem na direção do fluxo das águas subterrâneas.

Rebouças (1976) sistematizou as características hidráulicas do aquífero Botucatu com base nos dados existentes em toda bacia do Paraná. Nesse trabalho o autor fez uma avaliação das reservas e custos de exploração de água subterrânea na bacia do Paraná. O aquífero Botucatu foi considerado pelo autor como sendo o mais importante aquífero da bacia do Paraná, devido às suas excelentes propriedades hidráulicas, tais como coeficientes armazenamento variando entre 10^{-6} e 10^{-3} e permeabilidade entre 10^{-5} e 10^{-4} m/s.

Sinelli (1979) pesquisou as relações entre a composição química das águas subterrâneas e os diferentes tipos litológicos por elas atravessados, em áreas localizadas na bacia do Paraná e no embasamento cristalino. No Estado de São Paulo o autor estudou o aquífero Botucatu nos arredores do município de Ribeirão Preto, e constatou que a composição química das águas

subterrâneas reflete a natureza das rochas percoladas e também a intensidade do intemperismo que as rochas percoladas sofreram. O autor também observou que existe um aumento do pH e da condutividade no sentido do movimento do fluxo das águas do aquífero Botucatu.

Gallo e Sinelli (1980) efetuaram um estudo hidroquímico e isotópico nos aquíferos Botucatu e Serra Geral na região do município de Ribeirão Preto, a partir de 14 amostras de águas de poços. Segundo esses autores, a mineralização das águas do aquífero Botucatu é muito baixa na sua zona de afloramento, refletindo a influência apenas das precipitações locais. Caminhando para oeste, onde o aquífero encontra-se recoberto por basaltos intensamente fraturados, esta mineralização aumenta, principalmente no que se refere aos teores de cálcio, bicarbonato e sílica. Este enriquecimento salino é devido à hidrólise dos minerais dos basaltos provocada pela percolação de águas da chuva, pois a Formação Botucatu, constituída predominantemente de grãos de quartzo, praticamente não intervém na composição química do aquífero.

Teissedre & Barner (1981) analisaram o comportamento geotérmico e geoquímico das águas do aquífero Botucatu, e constataram que as altas temperaturas encontradas em poços profundos não estão relacionadas a nenhum tipo de anomalia geotérmica, mas correspondem a um gradiente geotérmico normal de $1^{\circ}\text{C}/35\text{m}$. Os autores verificaram um aumento nos teores de SiO_2 com o aumento da profundidade e destacaram que o bicarbonato, o sódio e o cálcio são os íons predominantes. Concluíram que nas áreas de afloramento do aquífero e proximidades as águas são bicarbonatadas cálcicas e apresentam a seguinte relação $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^{+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{HCO}_3^{-} > r\text{Cl}^{-}$. Nas zonas mais profundas do aquífero, as águas são bicarbonatadas sódicas ou carbonatadas sódicas, dependendo do pH, e apresentam as seguintes relações: $r\text{Na}^{+} \gg r\text{Ca}^{2+}$ e $r\text{HCO}_3^{-} > r\text{Cl}^{-}$ ou $r\text{Na}^{+} \gg r\text{Ca}^{2+}$ e $r\text{CO}_3^{2-} > r\text{Cl}^{-}$.

Sinelli & Souza (1982), interpretando os dados hidroquímicos de parte da bacia hidrográfica do rio Pardo, na região norte do Estado de São Paulo, verificaram que as águas do aquífero Botucatu são ácidas, com condutividade elétrica variando de 30 a 108 $\mu\text{S}/\text{cm}$; o ânion predominante é o bicarbonato e os cátions apresentam-se na seguinte seqüência: $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^{+} > r\text{K}^{+}$.

Silva *et al.* (1982) discutiram as características físico-químicas das águas do aquífero Botucatu a partir dos dados do DAEE, e atribuíram as mudanças na composição química destas águas, desde a área de afloramento até as áreas mais confinadas, a fenômenos de trocas de base, tempo de residência prolongado e aumento de temperatura.

Silva (1983) realizou um estudo hidroquímico e isotópico do aquífero Botucatu em todo o Estado de São Paulo e concluiu que:

- a evolução hidroquímica das águas deste aquífero é determinada pelas condições de confinamento do aquífero, pelas direções e sentidos do fluxo subterrâneo e pelo tempo de residência das águas;
- a presença dos íons maiores nessas águas pode ter as seguintes origens: Na^+ , K^+ - feldspatos e solos; Ca^{2+} - águas das chuvas e/ou dissolução dos plagioclásios e calcitas dos basaltos; HCO_3^- - reação do gás carbônico do solo com a água; Cl^- - precipitação meteórica e/ou dissolução da sericita presente em pequena quantidade na Formação Botucatu e Pirambóia, e da clorita, que existe como mineral secundário dos basaltos; SO_4^{2-} - águas meteóricas e dissolução dos sulfetos encontrados em pequena quantidade nos basaltos;
- no Estado de São Paulo, as águas do aquífero Botucatu apresentam três fácies hidroquímicas. A leste, na porção livre do aquífero, predominam águas bicarbonatadas magnesianas e cálcico-magnesianas; essas águas são pouco mineralizadas (resíduo seco inferior a 100 mg/L) e sua composição química está diretamente relacionada à das precipitações. Ao longo de uma faixa de 60 km de largura a partir do contato dos sedimentos Botucatu/Pirambóia com os basaltos da Formação Serra Geral, as águas são bicarbonatadas cálcicas e cálcico-magnesianas, com resíduo seco às vezes superior a 200 mg/L e aumento do pH. O enriquecimento salino é influenciado pela infiltração das águas ácidas e carregadas de CO_2 que, ao passarem através dos basaltos, provocam a dissolução incongruente de seus silicatos (plagioclásios e piroxênios), fornecendo cálcio, magnésio, sódio, potássio, ferro, sílica, e bicarbonato. Na zona francamente confinada do aquífero, as águas tornam-se bicarbonatadas sódicas, evoluindo no extremo oeste do estado (município de Presidente Prudente) para cloro-

sulfatadas sódicas, com pH alcalino e resíduo seco atingindo 650 mg/L, e apresentando um aumento no teor do íon fluoreto. Nessa região, o elevado tempo de residência e a alta temperatura das águas formam um quadro propício para o enriquecimento salino.

Kimmelman *et al.* (1989), através de estudo hidroquímico e isotópico em toda a porção brasileira do aquífero, concluíram que a recarga é devida principalmente às precipitações, e que as águas são essencialmente bicarbonatadas cálcicas nas bordas do aquífero, tornando-se bicarbonatadas sódicas no centro deste. Nesse mesmo sentido, que acompanha o progressivo confinamento do aquífero, as águas vão se tornando cada vez mais antigas e vão apresentando temperaturas cada vez mais elevadas.

Campos (1993) realizou a caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo, delineando regionalmente o comportamento hidrogeoquímico das águas subterrâneas no território estadual. Neste trabalho o autor menciona que, de todos os aquíferos existentes no Estado de São Paulo, somente o aquífero Botucatu apresenta em âmbito regional uma evolução hidrogeoquímica clássica, ou seja, enriquecimento salino acompanhado de um incremento iônico de sódio e de cloreto no sentido leste-oeste do Estado de São Paulo. O autor verificou ainda que o aquífero Botucatu na sua parte livre apresenta temperaturas que variam de 22 a 27 °C, pH de 5,40 a 9,27, e que a maioria das amostras apresentam teores salinos inferiores a 50 mg/L. Os tipos de águas predominantes dessa região são bicarbonatadas cálcicas seguidas de bicarbonatadas magnesianas. Na parte confinada, o aquífero Botucatu apresenta águas bicarbonatadas sódicas, com temperaturas entre 22 e 58 °C, pH de 6,30 a 9,80, e teores salinos na faixa de 50 a 500 mg/L.

Mais recentemente, Araújo *et al.* (1999) apresentaram uma síntese dos conhecimentos relativos ao aquífero Botucatu, agora denominado Mercosul ou Guarani, no qual comentam o quimismo das águas, baseados essencialmente no trabalho de Silva (1983) sobre as águas no Estado de São Paulo. Os dados hidroquímicos apresentados no trabalho de Silva (1983) também foram retomados por Sracek & Hirata (2001) que os utilizaram para propor um modelo explicativo para a evolução hidroquímica do aquífero.

Em síntese, ficou constatado através dos estudos acima mencionados que as águas subterrâneas do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo apresentam sentido do movimento do fluxo de leste para oeste. Mais a leste, situa-se a zona de recarga do aquífero, onde os sedimentos da Formação Botucatu e Pirambóia afloram, ou estão recobertos por pequena espessura de basaltos. Mais a oeste, o aquífero, recoberto por importante espessura de basaltos, é francamente confinado. A condutividade, o pH e a temperatura das águas tendem a aumentar no sentido do movimento do fluxo, assim como o enriquecimento salino, especialmente os teores de Na^+ e Cl^- . O aquífero na sua parte livre apresenta temperaturas próximas daquelas do ambiente e pH de ligeiramente ácido a alcalino; são águas predominantemente bicarbonatadas cálcicas ou, em menor grau, bicarbonatadas magnesianas. Na porção confinada do aquífero, as águas estão geralmente à temperatura ambiente, podendo, no entanto, alcançar até 60°C , e os pH vão de próximos da neutralidade até a valores francamente alcalinos. As águas são do tipo bicarbonatadas sódicas, podendo chegar a cloretadas sódicas no extremo oeste do Estado.

No presente trabalho o objetivo foi o de detalhar o estudo hidrogeoquímico do aquífero Botucatu na porção média da bacia dos rios Mogi e Pardo, no noroeste do Estado de São Paulo. Foram estudadas 38 amostras numa área de aproximadamente 140 por 120 km, perfazendo uma média de uma amostra por 450 km^2 . A região estudada abrange porções do aquífero aflorante a leste, e do aquífero confinado a oeste, o que permitiu estabelecer a evolução hidrogeoquímica das águas no sentido do fluxo, a partir da área de recarga. Foi também investigada a possibilidade de contaminação por fontes antrópicas, uma vez que o aquífero é altamente vulnerável a esse tipo de contaminação, e suas águas são intensamente utilizadas para o consumo humano. Os dados obtidos serão utilizados como subsídio ao projeto **Macrozoneamento Ambiental da Bacia Hidrográfica Mogi-Pardo**, que está sendo realizado pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo em associação com a CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

II - CARACTERÍSTICAS DA ÁREA

1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo está localizada na porção paulista do flanco sudeste da Bacia do Paraná e restringe-se a uma pequena parte do aquífero Botucatu. Está situada entre os paralelos 20°45' e 22°15' de latitude sul e os meridianos 47°30' e 48°30' de longitude oeste, englobando os limites da bacia hidrográfica Mogi-Pardo na sua porção média (Figura II.1).

2- CLIMA

A região situa-se na faixa intertropical. De acordo com dados de temperatura, chuvas, evaporação e umidade, o tipo climático dominante é o tropical, sendo o subtropical subsidiário. Na confluência do Rio Pardo com o Rio Mogi-Guaçu, onde predomina relevo mais acidentado e maior altitude, associados à maior retenção de umidade, predomina o clima subtropical (DAEE, 1974). Ambos os tipos climáticos apresentam dois períodos distintos: o período seco (abril a setembro) e o período chuvoso (outubro a março). O grau de umidade diminui de sudeste para noroeste e a evaporação potencial (1900 a 2300 mm anuais) cresce no mesmo sentido. As médias das temperaturas máximas diárias nunca ultrapassaram 32° C, e das mínimas nunca estiveram abaixo de 7° C, com amplitude térmica mensal de 6 a 9° C.

3 - GEOMORFOLOGIA E SOLOS

A região estudada está toda contida no Planalto Ocidental Paulista. Este planalto foi subdividido por Ross & Moroz (1997) em 6 unidades geomorfológicas distintas a saber: Planalto Centro Ocidental, Patamares Estruturais de Ribeirão Preto, Planaltos Residuais de Franca/Batatais, Planalto Residual de São Carlos, Planalto Residual de Botucatu e Planalto Residual de Marília.

A maior parte da área de estudo pertence à unidade geomorfológica denominada de Patamares Estruturais de Ribeirão Preto situada no interflúvio Mogi-Pardo. As formas de relevo são denudacionais, constituídas basicamente por colinas amplas e baixas, com topos tabulares. As altitudes estão entre 500 e 700 m e as declividades médias estão entre 2% e 10%. Esta unidade de relevo é constituída litologicamente por basaltos, e os solos são do tipo

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA NO ESTADO DE SÃO PAULO

LEGENDA

Figura II.1 -Mapa de localização dos municípios pertencentes à área de estudo

Latossolo Roxo, nos terrenos mais aplainados, e Terra Roxa Estruturada nas vertentes mais inclinadas. Os municípios da área de estudo pertencentes a essa unidade geomorfológica são: Orlândia, Sales Oliveira, Bebedouro, Pitangueiras, Pontal, Sertãozinho, Jardinópolis, Ribeirão Preto, Barrinha, Dumont, Pradópolis, Cravinhos, Serra Azul, Guataporã, São Simão, e Luís Antônio.

A porção leste da área, onde estão os municípios de Batatais, Brodowski, Santa Cruz da Esperança e Altinópolis, está contida na unidade geomorfológica denominada de Planaltos Residuais de Franca/Batatais. Esta unidade corresponde ao reverso da cuesta no interflúvio Mogi/Grande. As formas de relevo denudacionais são constituídas basicamente por colinas de topo aplainados ou tabulares. As altitudes variam entre 800 e 1100 m e as vertentes apresentam declividades que variam entre 2 e 10%. Litologicamente esta unidade é constituída por arenitos e lentes de siltitos; os solos são do tipo Latossolo Vermelho Amarelo.

A parte sudoeste da área, onde estão os municípios Analândia, Américo Brasiliense, Araraquara, Descalvado, Monte Alto, Guariba, Santa Lúcia e São Carlos, pertencem à unidade geomorfológica denominada de Planalto Residual de São Carlos. Esta unidade corresponde ao reverso da cuesta no interflúvio Tietê/Mogi. Predominam formas de relevo denudacionais constituídas de colinas de topos convexos e tabulares. As altitudes estão entre 600 e 900 m e as vertentes apresentam inclinação de 2 a 20%. Litologicamente esta unidade é constituída por depósitos arenosos e argilosos e os solos são do tipo Latossolo Vermelho Escuro.

4 - GEOLOGIA REGIONAL

Na região estudada encontram-se rochas das formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, pertencentes ao Grupo São Bento. No extremo oeste da área afloram as rochas sedimentares do Grupo Bauru. No extremo sudeste afloram as rochas sedimentares da Formação Corumbataí, pertencentes ao Grupo Passa-Dois. A Figura II.2 apresenta a carta geológica elaborada pelo IPT (1981). A seguir serão descritas as unidades dominantes na área.

CARTA GEOLÓGICA (IPT, 1981)

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA NO ESTADO DE SÃO PAULO

UNIDADES GEOLÓGICAS

- Depósitos aluvionais quaternários
- Grupo Bauru
- Formação Serra Geral
- Intrusivas Tabulares
- Formação Botucatu
- Formação Pirambóia
- Formação Corumbataí
- Contato entre as unidades

Figura II.2 - Carta geológica (IPT, 1981)

4.1. Formação Pirambóia

A Formação Pirambóia está exposta ao longo de toda a faixa de ocorrência dos sedimentos mesozóicos na Depressão Periférica. Na região estudada, esta formação aflora nos municípios de Descalvado, Analândia, Santa Rosa do Viterbo, Santa Cruz da Esperança. Litologicamente caracteriza-se pela sucessão de camadas arenosas, com algumas intercalações lenticulares de conglomerados. Os arenitos são geralmente de granulação média a fina, possuindo fração argilosa maior na parte inferior da Formação.

No Estado de São Paulo a Formação Pirambóia foi subdividida por Soares (1973) em dois membros: inferior e superior. O membro inferior é mais argiloso, com predominância de estratificação plano paralela e cruzada acanalada de pequeno porte. O membro superior é caracterizado pela disposição de bancos de arenito pouco argiloso, sucedidos por bancos de arenito muito argiloso, lamitos e argilitos arenosos, apresentando repetição cíclica.

Caetano-Chang & Wu 1993 e Caetano-Chang (1993; 1997), estudando a Formação Pirambóia na região de serra de São Pedro (SP), reconheceram a presença e o predomínio de texturas e estruturas consideradas diagnósticas de deposição em frentes de dunas e interdunas. Para esses autores, as fácies subaquosas teriam registro subordinado. O topo da Formação Pirambóia é composto por arenitos formados por depósitos de canais de rios entrelaçados e de leques aluviais, e estariam correlacionados lateral e verticalmente aos arenitos eólicos da Formação Pirambóia. Esta Formação está limitada em seu topo por uma discordância erosiva, subjacente à base da Formação Botucatu. No contato inferior com o Grupo Passa Dois não foi observada discordância erosiva (Matos, 1995).

Mineralogicamente, o conteúdo em quartzo atinge cerca de 90%, sendo os demais componentes da fração arenosa o feldspato (5 - 10%) e mica (menos de 11%). O cimento é à base de SiO_2 e/ou limonita, quimicamente precipitada (Soares, 1973). Classificam-se, segundo Wu & Caetano-Chang (1992) em subarcóseos, mineralogicamente maduros e texturalmente submaturos a maduros.

4.2. Formação Botucatu

A Formação Botucatu no Estado de São Paulo está exposta numa faixa contínua, recobrando a Formação Pirambóia. Na região estudada aflora nos municípios de São Simão, Serra Azul, Ribeirão Preto e Altinópolis.

Na base da Formação Botucatu, podem ocorrer camadas ou lentes de arenitos conglomeráticos com estratificações cruzadas. O contato superior com a Formação Serra Geral faz-se por interdigitação. A Formação Botucatu é constituída quase inteiramente de arenitos de granulação fina a média, com mineralogia uniforme e boa seleção de grãos de alta esfericidade. O quartzo atinge até 97%, e os feldspatos ocorrem em quantidade que varia de 3 a 7% (Soares, 1973). Classificam-se, segundo Wu & Caetano-Chang (1992), em quartzo-arenitos e subordinadamente em subarcóseos e são texturalmente maduros a supermaturos.

O pacote sedimentar da Formação Botucatu foi depositado pelo vento em extenso deserto com campos de dunas. Este ambiente se manteve até as manifestações vulcânicas. Após os primeiros derrames, as areias continuaram a ser movimentadas, formando os arenitos interderrames (IPT, 1981).

4.3. Formação Serra Geral

As rochas eruptivas da Formação Serra Geral (IPT, 1981) compreendem um conjunto de derrames de basaltos toleíticos, entre as quais intercalam-se arenitos com as mesmas características daqueles pertencentes à Formação Botucatu. Corpos intrusivos de mesma composição que o basalto estão associados na forma de diques e *sills*. Mineralogicamente, os principais constituintes do basalto são plagioclásio (labradorita) e piroxênio (augita e pigeonita). Os acessórios mais comuns são a titanomagnetita e apatita, ocasionalmente olivina, anfibólio e biotita. Os constituintes normais da matriz são quartzo, feldspato potássico, clorita e serpentina.

No Estado de São Paulo, os derrames afloram na parte superior das escarpas das cuestas basálticas, cobrindo grandes extensões. Na área de estudo afloram nos municípios de Morro Agudo, Batatais, Brodowski, Pontal,

Pitangueiras, Jardinópolis, Sertãozinho, Ribeirão Preto, Barrinha, Dumont, Pradópolis, Cravinhos, Luís Antônio e Araraquara.

5 - HIDROGEOLOGIA

O termo sistema aquífero refere-se a um conjunto de camadas e/ou formações geológicas distintas que apresentam características hidrodinâmicas similares e são hidráulicamente conectadas, compreendendo as áreas de recarga, trânsito e descarga. (Rebouças, 1976).

As águas aqui estudadas pertencem ao Sistema Aquífero Botucatu, atualmente denominado Sistema Aquífero Mercosul ou Guarani. Esse sistema (Araújo *et al.*, 1999) consiste de arenitos eólico-flúvio-lacustres, em sua maior parte confinados por basaltos, cobrindo uma extensão total de 1.195.500 km², abrangendo partes do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. No Brasil, os arenitos pertencem às formações Botucatu e Pirambóia e os basaltos à Formação Serra Geral. A espessura total do sistema aquífero varia de poucos metros a 800 m, sendo em média 276 m. A porosidade dos arenitos da Formação Botucatu é maior que a dos arenitos Pirambóia, assim como sua condutividade hidráulica. O menor conteúdo de argila dos arenitos Botucatu é o fator responsável por essa diferença. O limite inferior do aquífero é o aquitarde Permo-Triássico (Formação Rio do Rastro). O mapa da superfície potenciométrica indica fluxos de leste para oeste no Estado de São Paulo, de nordeste para sudoeste nos estados mais ao sul, e fluxo de sentido norte-sul no Estado do Mato-Grosso do Sul. A recarga é feita pela infiltração direta das águas das chuvas nas estreitas faixas correspondentes ao afloramento das Formações Pirambóia e Botucatu. Localmente é possível haver recarga pelas fraturas existentes no basalto, quando os níveis piezométricos deste forem maiores que o do aquífero confinado, o que ocorre na região próxima ao contato litológico da Formação Serra Geral com a Formação Botucatu, a leste da área (Silva, 1983).

III - MATERIAIS E MÉTODOS

1 - MATERIAIS

1.1. Seleção dos poços

A seleção dos poços foi realizada pela CPRM, a partir de um banco de dados dos poços perfurados por esta empresa, DAEE e empresas particulares, no aquífero Botucatu, dentro da área de estudo. Os poços foram selecionados tendo-se em vista respeitar os seguintes critérios:

- Serem de propriedade das prefeituras locais;
- Existirem dados sobre a localização geográfica e produção;
- Existirem registros dos perfis estratigráficos e dados referentes ao topo e base do filtro.

1.2. Coleta e preservação de amostras

A coleta das águas foi realizada pela CPRM em poços tubulares profundos de 37 municípios da bacia. O autor desta dissertação acompanhou parte do trabalho de coleta.

Nos municípios que utilizam água proveniente apenas do aquífero Botucatu, coletou-se, em cada um, uma única amostra, exceto nos municípios maiores de Ribeirão Preto e Sertãozinho, onde foram coletadas 5 e 3 amostras, respectivamente. Naqueles municípios que possuem poços no aquífero Serra Geral e no aquífero Botucatu, coletou-se uma amostra em cada aquífero.

Para o presente estudo, foram utilizados apenas os dados das águas provenientes do aquífero Botucatu, num total de 40 amostras.

A amostragem foi realizada entre os meses de outubro e dezembro de 1999, em plena estação chuvosa. As águas foram coletadas diretamente da boca do poço, após um período de 30 minutos de bombeamento contínuo, para remoção da água parada dentro da tubulação.

A obtenção e preservação das amostras para cada tipo de técnica analítica seguiram as recomendações especificadas pelo Laboratório de Águas Minerais da CPRM (LAMIN), baseadas no SMEWW (1995), descritas abaixo:

1.2.1. Amostras para cromatografia de íons

Coletaram-se 40 mL de água, utilizando-se uma seringa acoplada a um filtro com membrana de éster de celulose com malha de 0,45 μm . Transferiu-se a água para um tubo de centrifuga em polipropileno de 50 mL. Colocou-se o tubo em geladeira de isopor com bolsas de gelo e enviou-se para o LAMIN, no mesmo dia.

1.2.2. Amostras para ICP-AES

Coletaram-se 25 mL de água, utilizando-se uma seringa acoplada a um filtro com membrana éster de celulose 0,45 μm . Transferiu-se a água para um tubo de centrifuga em polipropileno de 50 mL e acidificou-se com 10 gotas de ácido nítrico 1:1, para preservação dos cátions e enviou-se para o LAMIN, no mesmo dia.

1.2.3. Amostras para Absorção Atômica

Foram coletados 2 L de água, diretamente da boca do poço. Armazenou-se em recipientes plásticos e colocou-se em geladeira de isopor com bolsas de gelo. As amostras foram enviadas para o LAMIM, no mesmo dia. Essas amostras foram utilizadas também para determinação em laboratório do pH, condutividade e dureza.

1.3. Medidas dos parâmetros físico-químicos em campo

No momento da coleta, foram medidos condutividade elétrica, pH e temperatura da água e do ambiente. Utilizou-se pHmetro e condutivímetro previamente calibrados, que mediram também a temperatura da água. A localização geográfica do poço foi determinada utilizando-se o GPS. Mediu-se a temperatura ambiente através de um termômetro embutido no GPS.

2 - MÉTODOS

2.1. Técnicas analíticas

As análises químicas das águas foram efetuadas no LAMIN, seguindo a metodologia descrita no SMEWW (1995) e parcialmente acompanhadas pelo autor desta dissertação. A dosagem dos ânions e do NH_4^+ foi realizada por cromatografia de íons. Os cátions foram dosados por ICP/AES, com exceção

do K^+ e Na^+ , dosados por absorção atômica. A dosagem do CO_3^{2-} e HCO_3^- foi realizada por titulação.

2.1.1. Cromatografia de íons

Cromatografia de íons é o processo de separação dos componentes de uma mistura através de sua partição entre duas fases: uma móvel (gasosa ou líquida) e outra estacionária (líquida ou sólida). A fase estacionária é uma resina polimérica contendo sítios ativos funcionais, colocada no interior de uma coluna. A fase móvel é um líquido que flui através do sistema cromatográfico, cuja função é conduzir a amostra para integrar-se com a fase estacionária.

A separação ocorre através da coluna da seguinte maneira: os componentes da amostra são carregados pela fase móvel através da coluna, que é específica para cada tipo de análise. Desta forma, se o objetivo da análise for os ânions, a coluna utilizada terá mais afinidade com os ânions.

A velocidade de migração de um componente é função do equilíbrio da distribuição da amostra entre as fases móvel e estacionária. Os componentes que têm afinidades com a fase estacionária migram mais lentamente, devido à retenção na coluna. Os que não têm afinidades com a fase estacionária não ficam retidos na coluna. Assim, é possível separar os elementos de uma mistura complexa.

O LAMIN utiliza a cromatografia de íons para dosagem dos ânions. Na análise das águas subterrâneas, sete ânions foram considerados: fluoreto, cloreto, nitrito, brometo, nitrato, fosfato e sulfato. Esses ânions estão representados em ordem crescente de afinidade com a coluna. Desta forma, o fluoreto, que apresenta uma menor afinidade com a coluna, sairá da coluna primeiro que o cloreto, o cloreto sairá primeiro que o nitrito, e assim sucessivamente. O modo de separação tipicamente utilizado para a separação de ânions e cátions é a troca iônica. Durante o processo cromatográfico, o contra-íon da fase móvel é trocado pelo íon da amostra e, por um curto período de tempo, este permanece ligado à carga fixa do material polimérico. Na calibração do cromatógrafo, o tempo de retenção de cada ânion é estabelecido por meio de padrões. Cada padrão é constituído apenas pelo ânion que será quantificado. Este procedimento é repetido para todos os ânions de interesse, e o tempo de retenção de cada um é registrado no programa do equipamento.

Quando uma amostra de composição desconhecida passa pelo equipamento, os seus ânions ficam retidos na coluna. O tempo de retenção desses ânions é comparado com aquele fornecido pelo padrão. Assim, a cromatografia de íons é um método quantitativo e não qualitativo. Isso significa que o aparelho não reconhece qual é o elemento que está sendo analisado, ele apenas fornece o tempo de retenção do elemento na coluna, o que é proporcional à quantidade do elemento. No caso da análise das águas deste estudo foram utilizados padrões na faixa de 0,02 a 50 mg/L para os sete ânions analisados, e na faixa de 0,025 a 0,5 mg/L para o amônio, feitos a partir de soluções certificadas Merck (1000 mg/L). As faixas utilizadas os limites de detecção para cada ânion estão na tabela abaixo.

Elemento	Limite mg/L	PADRÕES						
		A	B	C	D	E	F	G
Br ⁻	0,05	50	25	5	2,5	0,5	0,25	0,1
Cl ⁻	0,05	10	5	1	0,5	0,3	0,1	0,02
F ⁻	0,01	10	5	1	0,5	0,3	0,1	0,02
NO ₃ ⁻	0,1	50	25	5	2,5	0,5	0,3	0,1
PO ₄ ⁻	0,2	50	25	5	2,5	0,5	0,3	0,1
SO ₄ ⁻	0,1	50	25	5	2,5	0,5	0,3	0,1
NO ₂ ⁻	0,1							

2.1.2. ICP-AES (Plasma de indução acoplada associado a espectrômetro de emissão atômica)

A espectrometria de plasma é baseada no princípio segundo o qual a determinação da região apropriada na chama do plasma de argônio permite que as linhas de emissão atômica e iônica das amostras possam ser medidas contra intensidades de emissão do *background* muito baixas. As altas temperaturas da chama asseguram eficiente atomização, de modo a diminuir muito as interferências químicas.

A resposta instrumental deve ser primeiramente calibrada, utilizando-se uma amostra de composição conhecida que contenha os elementos analisados. Além de fornecer uma curva de resposta geral, a curva de calibração pode ser utilizada para compensar os pequenos efeitos de interferência, particularmente a variação na nebulização e eficiência no transporte das amostras causada pela diferença no conteúdo de sólido total

dissolvido e concentração ácida. É preferível que haja uma semelhança na composição do padrão e da amostra para obtenção de melhores resultados.

No caso da análise das águas deste estudo foram utilizados padrões na faixa de 0,5 a 40 mg/L para os 26 elementos analisados, feitos a partir de soluções certificadas Merck (1000 mg/L). Os limites de detecção para cada elemento estão na tabela abaixo.

Elemento	Limite mg/L	Elemento	Limite mg/L
Al	0,1	Mn	0,001
As	0,01	Mo	0,005
B	0,002	Ni	0,002
Ba	0,002	Pb	0,005
Be	0,001	Sc	0,005
Ca	0,001	Se	0,02
Cd	0,001	Si	0,01
Co	0,002	Sn	0,01
Cr	0,02	Sr	0,001
Cu	0,01	Ti	0,05
Fe	0,002	V	0,02
Li	0,001	W	0,01
Mg	0,01	Zn	0,001

2.1.3. Absorção Atômica

A espectrometria de absorção atômica é baseada na absorção, por átomos, da energia de uma radiação característica. Esta ocorre quando um elétron periférico de um átomo analisado muda de nível de energia, passando de um estado neutro para um estado de mais alta energia (excitado), através da absorção da energia radiante de um comprimento de onda específico.

A dosagem química quantitativa de um elemento por absorção atômica só é possível porque existe uma correlação entre o grau de absorção (que pode ser medido) e a quantidade de átomos presentes. Os átomos capazes de absorver a radiação de frequência característica do elemento são aqueles não excitados chamados de átomos neutros, e não a totalidade dos átomos.

Para se efetuar a dosagem de um elemento por Absorção Atômica, a amostra solubilizada é dissociada em átomos na chama (queimador). Os átomos neutros (não excitados) do elemento que será analisado absorvem a radiação característica (proveniente de uma fonte de radiação que fornece a frequência de ressonância do elemento a determinar). Assim, a intensidade da radiação transmitida naquele comprimento de onda (selecionada pelo

monocromador) será tanto menor quanto mais átomos estiverem presentes. A energia absorvida pelo átomo será emitida em seguida, quando os átomos retornarem para seus orbitais originais, mas essa emissão se dará em todas as direções, enquanto que a absorção se dá apenas na direção da radiação incidente. O aparelho fornece uma leitura proporcional à absorção. Dessa forma deve-se zerar o aparelho para uma absorção nula, ou seja 100% de transmissão de energia incidente.

Para certas faixas de concentração (variáveis de elemento para elemento), há uma relação aproximadamente linear para concentração e absorção. Deste modo, fazem-se os padrões nessas faixas e diluem-se as amostras para que suas concentrações caiam na mesma faixa. Constrõem-se as curvas de concentração no padrão *versus* absorção, lêem-se as medidas de absorção para as amostras e faz-se a interpolação.

No caso da análise das águas deste estudo foram utilizados padrões na faixa de 0,5 a 10 mg/L para sódio e potássio, feitos a partir de soluções certificadas Merck (1000 mg/L). O limite de detecção para sódio e potássio é de 0,1 mg/L.

2.2. Tratamento dos dados

Com os resultados das 40 amostras analisadas para 37 cátions e ânions, elaborou-se uma planilha no programa Excel. Foram excluídos desta planilha os elementos que apresentaram, para quase todas ou todas as amostras, valores abaixo do limite de detecção (Al, As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sc, Se, Sn, Ti, V, W, NO₂, Br), de modo que, para esse trabalho, foram considerados apenas os seguintes cátions e ânions: B³⁺, Ba²⁺, Fe²⁺, Li⁺, Mn²⁺, Sr²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SiO₂, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ e CO₃²⁻.

Em seguida, foram realizados cálculos de transformação dos resultados dos íons maiores, originalmente em mg/L, para meq/L (miliequivalente por litro), e calcularam-se as seguintes relações iônicas: rK^+/rNa^+ , $rCl^-/rHCO_3^-$, rSO_4^{2-}/rCl^- .

Para transformação dos resultados em mg/L para meq/L, utilizou-se a equação de Stabler:

$$\text{meq/L} = P \times V / P_a$$

onde:

P = concentração em mg/L do íon

P_a = Peso atômico do elemento

V = Valência do elemento

Os valores em meq/L foram utilizados também para cálculo dos erros analíticos, através do balanço iônico, segundo a equação:

$$e\% = (r\sum\text{cátions} - r\sum\text{ânions}) / (r\sum\text{cátions} + r\sum\text{ânions}) \times 100$$

Os percentuais de erros, no balanço iônico, calculados para as 40 amostras, foram comparados com as suas respectivas condutividades elétricas. Nas águas com baixa condutividade elétrica admite-se uma maior percentagem de erros no balanço iônico. Os erros permitidos no cálculo do balanço iônico em função da condutividade elétrica, segundo Custódio & Llamas (1976), estão na tabela abaixo.

Cond. Elétrica (μS/cm)	50	200	500	2000	>2000
Erro permitido (%)	30	10	8	4	<4

Os erros no balanço iônico apresentaram-se geralmente bem abaixo dos erros máximos permitidos em 38 amostras. Duas amostras (6 e 30), que apresentaram erro muito próximo do erro máximo permitido (30%), foram descartadas. Observou-se que nessas duas amostras a soma dos ânions é menor que a soma de cátions. Essas amostras provêm da zona de afloramento do aquífero onde, devido à baixa salinização, podem ocorrer grandes erros analíticos na determinação de sulfato e cloreto, como foi constatado por Silva (1983).

Os teores em mg/L foram também transformados em mol/L, para elaboração dos diagramas de equilíbrio dos minerais aluminossilicáticos.

A planilha final de resultados refere-se, portanto, a 38 amostras e 23 variáveis, sendo 19 íons e 4 parâmetros (pH, condutividade, temperatura e dureza).

2.2.1. Distribuição em área

Confeccionou-se, através do programa GWW (1995), o mapa de localização dos 38 poços selecionados, sobre o qual foram traçadas curvas de isovalores para superfície potenciométrica, condutividade, temperatura, pH, relações iônicas e teores dos elementos dosados.

2.2.2. Tratamento estatístico

As variáveis que receberam tratamento estatístico foram os teores dos elementos em mg/L, a condutividade em uS/cm, a temperatura em °C, a dureza em mg/L de CaCO₃, e o pH. O programa utilizado foi o STATISTICA FOR WINDOWS (1993). Inicialmente foram calculados:

- Médias aritméticas, medianas e desvios-padrão;
- Frequências representadas em histogramas;
- Correlações entre as variáveis.

Em seguida, foram realizadas análises multivariadas:

- Análise fatorial

A análise fatorial é uma técnica que resume as informações contidas em uma matriz de dados com n variáveis. Para isso, um reduzido número de fatores (f) é identificado, de modo que f seja menor que n , e represente as variáveis originais, com uma perda mínima. A base do cálculo constitui-se na extração dos autovalores e autovetores da matriz de variância e covariância. Alguns exemplos das aplicações da análise fatorial em Geologia encontram-se em Davis (1986).

Com relação a dados hidrogeoquímicos é muito difundida a aplicação da análise fatorial, sobretudo na sua modalidade R, isto é, investigando as relações entre as variáveis. Ela é utilizada principalmente na identificação de distintos grupos de águas que podem ser relacionados a diferentes processos de evolução hidrogeoquímica (Dalton & Upchurch, 1978; Usunoff & Guzman-Guzman, 1989; Grande *et al.*, 1996; Huizar *et al.*, 1998; Cerón *et al.*, 1999; Suk

& Lee, 1999). A cartografia dos fatores (Ashley & Lloyd, 1978) pode permitir, por exemplo, identificar nos aquíferos áreas de recarga (Briz-Kishore & Murali, 1992) ou áreas de características comparáveis para o consumo (Sánchez-Martos *et al.*, 2001).

A determinação do número de fatores a ser utilizado no modelo pode basear-se no critério proposto por Kaiser, 1960 (*In STATISTICA FOR WINDOWS*). Esse autor sugere que sejam considerados no modelo apenas os fatores que apresentem autovalores maiores que 1, pois os autovalores menores que 1 são menos eficientes que a própria variável na explicação da variância total. Cattell, 1966 (*In STATISTICA FOR WINDOWS*), por outro lado, propõe que a escolha do número de fatores seja baseada em um diagrama que represente os fatores *versus* seus respectivos autovalores. Será escolhido o número de fatores a partir do qual a curva descendente muda de inflexão. De modo geral, há boa convergência entre esses dois critérios.

A proporção da variância de uma variável que é explicada pelo fator comum é denominada de comunalidade. A comunalidade de uma variável é calculada pela soma dos quadrados dos pesos fatoriais dessa variável.

Os cálculos efetuados para a análise fatorial são os seguintes:

- Cálculo da matriz de correlação entre as variáveis, a partir da matriz de dados originais;
- Extração dos autovalores da matriz de correlação e suas respectivas porcentagens de explicação da variância total;
- Cálculo da matriz das cargas fatoriais (*factor loadings*);
- Rotação da matriz dos pesos fatoriais, para tornar a interpretação mais fácil;
- Cálculo das comunalidades;
- Cálculo dos *scores*;
- Representação das variáveis em diagramas que plotam as cargas em relação aos fatores;
- Representação das amostras em diagramas que plotam os *scores* em relação aos fatores.

- Análise de agrupamento

Trata-se de um conjunto de técnicas que classificam variáveis ou amostras de comportamento semelhante. Esses agrupamentos podem ser representados por diagramas, dos quais o mais utilizado é o dendograma (Davis, 1986). Para dados hidrogeoquímicos, a análise de agrupamento é geralmente utilizada em associação com a análise fatorial, visando finalidades semelhantes.

Para a execução da análise de agrupamento deve-se, inicialmente, calcular uma matriz $n \times n$ de similaridade entre todos os pares de observação. Essa matriz de similaridade pode usar o coeficiente de correlação para agrupar as variáveis de comportamento semelhante, ou a distância euclidiana para agrupar as amostras com comportamento semelhante.

Neste estudo, a matriz de similaridade foi construída com os coeficientes da distância euclidiana entre as amostras. A distância euclidiana é calculada da seguinte maneira (Davis, 1986):

$$d_{ij} = [\sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{jk})^2 / m]^{1/2}$$

onde d_{ij} é a distância euclidiana entre as amostras;

X_{ik} - representa a k ésima variável medida na amostra i ;

X_{jk} - representa a k ésima variável medida na amostra j ;

m - indica o número de variáveis.

O par com mais alta similaridade mútua, ou seja, com a menor distância euclidiana, é reunido e tratado como um só objeto, sendo recalculadas as distâncias entre as outras amostras e esse par, através da média das distâncias que cada amostra mantinha com cada amostra do par. Esse processo é repetido até que se obtenha uma matriz 2×2 , indicando a distância euclidiana entre os dois principais grupos de amostras.

2.2.3. Diagramas de caracterização e classificação das águas

Os resultados das análises químicas das 38 amostras foram projetados nos diagramas de Piper e Stiff.

Diagrama de Piper

Esse diagrama classifica as águas e permite comparar os distintos grupos químicos. Calculou-se a percentagem (em miliequivalente por litro) de cada cátion ou ânion em relação ao total dos cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$) e ao total dos ânions (Cl^{-} , SO_4^{2-} , $(\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^{-})$), respectivamente. Os valores encontrados foram projetados no triângulo de cátions e de ânions, e em seguida projetados no losango. O cruzamento do prolongamento desses dois pontos, na área do losango, determina o tipo químico da amostra de água.

Diagrama de Stiff

No diagrama de Stiff as concentrações iônicas em meq/L são representadas sobre linhas paralelas horizontais, sendo que, do lado direito, ficam os ânions e do esquerdo, os cátions, resultando numa figura geométrica característica para cada amostra de água analisada. Essa representação tem como objetivo facilitar a visualização da composição química das águas e poder comparar rapidamente as diferentes amostras.

2.2.4. Cálculo dos equilíbrios

Utilizou-se o programa MINTeqA (1991) para os cálculos de equilíbrio entre as águas e alguns minerais. Esse programa calcula o grau de saturação ou insaturação das águas em relação aos minerais mais comuns, partindo dos teores dos elementos químicos presentes e das medidas *in situ* da temperatura e pH. Compara-se a constante de equilíbrio da reação de dissolução do mineral na água (K_{sat}) com o produto da atividade iônica na solução (PAI).

O logaritmo da razão entre o produto de atividade iônica (PAI) e a constante de equilíbrio da solubilidade do mineral (K_{sat}) é conhecido como índice de saturação (SI). Se a razão for igual a 0, a solução está em equilíbrio com o mineral. Se $\text{PAI} < K_{\text{sat}}$, $\text{SI} < 0$, e a solução é insaturada em relação ao mineral e poderá dissolvê-lo. Se $\text{PAI} > K_{\text{sat}}$, $\text{SI} > 0$, e a solução é supersaturada em relação ao mineral, não podendo dissolvê-lo e podendo, eventualmente precipitá-lo.

A seqüência das operações realizadas pelo MINTEQA é:

- ajuste da constante de equilíbrio, definida a 25⁰ C, para a real temperatura da água;
- cálculo da força iônica e do coeficiente da atividade;
- formulação de uma série de equações de equilíbrio de massa para cada espécie na análise;
- resolução desse conjunto de equações;
- cálculo do produto de solubilidade de uma série de minerais e comparação com os respectivos produtos de atividade iônica;
- listagem dos índices de saturação dos minerais.

2.2.5. Diagramas de estabilidade dos aluminossilicáticos

O equilíbrio mineral-solução dos minerais aluminosos, tais como feldspatos e caulinita, é avaliado em diagramas conhecidos como diagramas de estabilidade ou diagramas de atividade. Esses diagramas são formados por linhas que representam as reações de equilíbrio e separam os campos de estabilidade das fases minerais. Os diagramas de estabilidade dos silicatos foram construídos a partir dos valores das atividades dos íons, expressos em molaridade, para os seguintes sistemas:

- Sistema $\text{H}_2\text{O} - \text{Si}(\text{OH})_4^0 - \text{Na}^+$ (gibbsita, caulinita, Na-montmorilonita e albita). No eixo y é representado o $\log [\text{Na}^+]/[\text{H}^+]$ e no eixo x é representado o $\log[\text{Si}(\text{OH})_4]$;
- Sistema $\text{H}_2\text{O} - \text{Si}(\text{OH})_4^0 - \text{Ca}^{++}$ (gibbsita, caulinita, Ca-montmorilonita e anortita). No eixo y é representado o $\log [\text{Ca}^{++}]/[\text{H}^+]$ e no eixo x é representado o $\log[\text{Si}(\text{OH})_4]$;
- Sistema $\text{H}_2\text{O} - \text{Si}(\text{OH})_4^0 - \text{K}^+$ (gibbsita, caulinita, muscovita e microclínio). No eixo y é representado o $\log [\text{K}^+]/[\text{H}^+]$ e no eixo x é representado o $\log[\text{Si}(\text{OH})_4]$.

Os diagramas utilizados foram retirados de Freeze & Cherry (1979). Transformaram-se, inicialmente, os teores dos elementos analisados, expressos em mg/L, para mol/L, e calcularam-se os seguintes valores: $\log[\text{Si}(\text{OH})_4]$, $\log [\text{Ca}^{++}]/[\text{H}^+]$, $\log [\text{Na}^+]/[\text{H}^+]$ e $\log [\text{K}^+]/[\text{H}^+]$. Esses valores foram

projetados nos 3 diagramas correspondentes aos sistemas acima mencionados.

IV - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

1 - MAPA POTENCIOMÉTRICO

A partir dos valores dos níveis estáticos aparentes de poços construídos na região nas décadas de 70 a 90 (Anexo 1), foi elaborado o mapa da superfície potenciométrica (Fig. IV.1). Verifica-se que a superfície potenciométrica encontra-se inclinada para noroeste. No extremo sudeste da área, os níveis estáticos atingem 750 m, decrescendo para 450 m em direção a oeste. Assim, o sentido preferencial do fluxo das águas subterrâneas do aquífero Botucatu, dentro da área de estudo, acompanha o sentido geral de leste para oeste. Na região de Ribeirão Preto, devido ao intenso bombeamento do lençol, ocorre um rebaixamento no nível potenciométrico, resultando em um contra-fluxo local.

Levando em conta simultaneamente o mapa geológico (Fig.II.2), o mapa potenciométrico (Fig.IV.1) e os perfis descritivos dos poços (Anexo 1), verifica-se que a área de recarga do aquífero e sua porção livre estão a leste, correspondendo aos poços 4, 7, 8, 9, 10, 12, 16, 17, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 35, 36, 44, 45, 46, 47. Os poços 4, 20 e 25 estão localizados na área de afloramento da Formação Pirambóia e os demais na área de afloramento da Formação Botucatu. O aquífero confinado corresponde aos poços 1, 2, 11, 13, 19, 23, 32, 33, 37, 38, 40, 42, que captam água apenas da Formação Botucatu, e aos poços 5, 14 e 31, localizados no extremo oeste da área, que captam água tanto dos sedimentos da Formação Botucatu, como dos sedimentos sotopostos da Formação Pirambóia.

2 - COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS

A Tabela IV.1 apresenta os teores em mg/L dos íons analisados e os valores de pH, temperatura (°C), dureza (mg/L de CaCO₃) e condutividade (uS/cm), para a população considerada de 38 amostras.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Figura IV.1 - Curvas de isovalores de nível estático aparente, representando o fluxo das águas subterrâneas do aquífero Botucatu, dentro da área de estudo

Tabela IV.1 Teores em mg/L dos íons analisados e valores de pH, dureza em mg/L de CaCO₃, temperatura °C e condutividade em uS/cm

Poço	Teores expressos em mg/L																			pH	Temp °C	Dureza mg/L	Condutivid. (uS/cm)
	B ³⁺	Ba ²⁺	Zn ²⁺	Fe ²⁺	Li ⁺	Sr ²⁺	Mn ²⁺	Si ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻				
1	0,026	0,004	0,007	0,065	0,006	0,254	0,004	7,25	20,92	1,21	15,6	2,4	0,062	0,183	0,1	0,05	1,97	99,6	3,1	8,11	32,6	55	191,2
2	0,02	0,002	0,003	0,002	0,001	0,123	0,001	6,56	23,3	2,73	5,6	2,7	0,031	0,092	0,06	0,05	0,32	93,4	3,1	7,85	30	67	161,7
4	0,018	0,002	0,004	0,004	0,001	0,093	0,001	7,55	4	0,64	44	0,5	0,031	0,104	0,06	0,05	1,35	112	5,6	8,26	25,6	14	212
5	0,002	0,002	0,002	0,008	0,02	0,017	0,001	13,91	2,44	0,03	67	0,5	0,149	6,45	1,13	0,05	10,01	154,4	36,7	9,31	26,3	6	318
7	0,024	0,043	0,008	0,003	0,001	0,016	0,001	8,18	1,64	0,81	0,4	2,2	0,05	0,023	0,21	0,05	0,05	11,6	0,5	5,69	24,4	10	25,8
8	0,026	0,064	0,006	0,004	0,001	0,026	0,002	8,39	3,9	0,97	0,9	3,1	0,05	0,041	0,38	0,06	0,04	20,1	0,5	5,95	25	14	40,6
9	0,002	0,067	0,014	0,011	0,001	0,052	0,002	10,16	9,53	3,56	2,6	3,8	0,013	0,238	0,18	0,23	0,11	50,7	0,5	6,12	25,7	36	92,9
10	0,002	0,055	0,009	0,015	0,001	0,038	0,002	9,69	7,36	2,05	2,2	4	0,031	0,263	0,35	0,05	0,11	38,7	0,5	6,05	26,1	27	73,4
11	0,019	0,014	0,105	0,02	0,001	0,098	0,001	14,08	17,22	4,53	3,3	2,8	0,011	0,413	2,45	0,05	0,19	74,7	0,5	6,67	26,7	57,5	133
12	0,002	0,112	0,009	0,003	0,001	0,035	0,001	10,94	3,4	1,11	1,5	5,8	0,05	0,018	0,07	0,09	0,08	26,6	0,5	6,08	27,2	15,5	51,8
13	0,026	0,042	0,025	0,24	0,001	0,06	0,002	11,12	26,58	3,49	2,1	4,2	0,016	0,5	0,09	0,57	0,17	102,1	0,5	6,79	27,6	76	174,3
14	0,002	0,002	0,002	0,003	0,022	0,102	0,001	7,42	7,84	0,1	30	1,6	0,02	0,272	0,39	0,05	1,75	89,6	6,1	8,25	38	21,5	183,3
16	0,002	0,078	0,271	0,367	0,001	0,013	0,03	8,37	3,04	0,53	0,6	2,3	0,05	0,03	0,71	0,05	0,03	13,2	0,5	6,05	22,7	10	32,3
17	0,002	0,056	0,019	0,003	0,001	0,013	0,042	4,74	1,83	1,06	1,4	1,5	0,05	1,36	9	0,05	0,46	5,9	0,5	5,62	25,1	11,5	36,8
19	0,032	0,057	0,16	0,019	0,001	0,216	0,006	9,7	35,09	5,09	2,6	4,1	0,108	0,054	0,05	0,05	0,34	134,5	4,9	7,64	27,2	135	250
20	0,054	0,01	0,005	0,004	0,009	0,011	0,001	8,61	0,91	0,15	67	1	0,339	0,446	1,45	0,05	8,97	64,7	50,8	9,42	23	5	342
21	0,019	0,018	0,006	0,004	0,001	0,009	0,001	13,9	1,73	0,44	0,8	2,4	0,038	0,035	0,23	0,05	0,09	10,9	0,5	6,16	24,6	9	25,4
22	0,026	0,077	0,012	0,014	0,001	0,018	0,002	5,43	1,36	0,71	1,7	1,1	0,05	0,91	6,29	0,05	0,06	6,6	0,5	5,67	23,4	9	28,8
23	0,039	0,001	0,005	0,004	0,003	0,235	0,001	5,52	21,4	4,4	6,3	2,4	0,057	0,043	0,11	0,1	0,5	95,6	2,5	6,04	29,7	110	178
24	0,025	0,035	0,012	0,006	0,001	0,023	0,001	8,66	2,63	1,11	0,8	1,5	0,066	0,023	0,07	0,54	0,05	15,4	0,5	6,17	25,1	12	32,1
25	0,002	0,014	0,023	0,021	0,004	0,055	0,002	8,44	4,64	0,38	35	1,3	0,128	1,1	3,23	0,05	2,17	106	0,5	9,09	25,9	14	176,3
26	0,002	0,083	0,011	0,007	0,001	0,015	0,001	10,64	1,48	1,04	0,6	3,4	0,038	0,291	3,52	0,05	0,26	12	0,5	5,87	23,3	13	34,8
27	0,002	0,097	0,014	0,003	0,001	0,028	0,001	10,6	4,91	1,67	2,1	4,2	0,045	0,255	0,62	0,05	0,33	33	0,5	6,42	23,3	23	60,2
28	0,002	0,006	0,008	0,002	0,001	0,03	0,001	13,87	7,39	1,16	1,7	7,3	0,121	0,035	0,94	0,05	0,11	44	0,5	6,67	25,6	23	75,9
29	0,002	0,036	0,017	0,003	0,001	0,038	0,001	10,98	4,43	1,52	1,6	3,2	0,066	0,07	0,25	1,1	0,05	29	0,5	6,67	24	19	54,9
31	0,013	0,002	0,003	0,002	0,003	0,04	0,001	6,67	5,98	0,27	33	0,8	0,358	1,41	0,56	0,05	4,78	84	11	8,6	28,5	19	173,9
32	0,002	0,016	0,006	0,002	0,002	0,066	0,003	8,88	27,32	1,99	5,2	4,2	0,108	0,11	0,17	0,25	0,45	98	3	7,7	29,7	78	170,3
33	0,002	0,17	0,004	0,002	0,002	0,066	0,002	8,66	24,38	1,62	5,3	3,8	0,077	0,055	0,04	0,05	0,33	88	3	7,9	29	69	153,6
35	0,002	0,071	0,004	0,015	0,001	0,036	0,001	8,57	4,43	1,68	1,4	2,3	0,045	0,255	0,62	1,4	0,33	25	0,5	5,96	26,3	17	47,4
36	0,002	0,019	0,008	0,003	0,001	0,032	0,002	9,38	2,97	1,06	1,9	2,2	0,018	0,063	0,66	0,05	0,15	21	0,5	5,45	24	12	28,1
37	0,002	0,01	0,008	0,005	0,001	0,068	0,001	6,72	22,03	1,51	5,4	3,3	0,173	0,219	0,08	0,05	1,18	80	0,5	7,82	31,5	63	142,2
38	0,002	0,025	0,007	0,006	0,001	0,066	0,003	8,04	23,48	2,59	13	4	0,017	0,038	0,07	0,05	0,33	98	0,5	8,6	29	69	189
40	0,002	0,007	0,01	0,002	0,001	0,068	0,001	7,11	18,85	1,95	4	2,6	0,057	0,048	0,28	0,05	0,16	74	0,5	8,11	28,6	55	130,3
42	0,002	0,018	0,007	0,005	0,002	0,066	0,002	10,58	24,39	2,55	5,9	2,7	0,025	0,484	0,21	0,13	0,42	93	0,5	7,54	30,5	73	165
44	0,002	0,054	0,005	0,006	0,001	0,041	0,001	8,05	6,33	1,33	2,3	8,5	0,129	0,125	6,29	0,05	0,06	44	0,5	6,98	26,3	22	75
45	0,002	0,113	0,001	0,002	0,001	0,053	0,001	8,48	5,44	1,56	2	7,5	0,06	0,082	0,13	0,05	0,13	39	0,5	6,1	30	20	71
46	0,002	0,063	0,005	0,002	0,001	0,019	0,001	9,26	2,12	1,04	1,2	3,7	0,025	0,187	0,02	0,05	0,19	19	0,5	6,11	29,8	10	35,4
47	0,002	0,072	0,015	0,042	0,001	0,035	0,001	5,38	2,48	1,4	1,6	1,8	0,05	1,4	1,55	0,05	0,07	8	0,5	5,73	23,3	12	53,3

A Tabela IV.2 apresenta os valores das médias, medianas, desvios-padrão, mínimos e máximos dos teores dos íons analisados e dos parâmetros físico-químicos determinados; na coluna da direita está indicado o número de amostras abaixo do limite de detecção para cada um dos íons.

	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	n < L.D.
B ³⁺	0,011	0,002	0,013	0,002	0,054	24
Ba ²⁺	0,043	0,035	0,039	0,001	0,17	1
Zn ²⁺	0,022	0,008	0,051	0,001	0,271	1
Fe ²⁺	0,024	0,004	0,069	0,002	0,367	8
Li ⁺	0,003	0,001	0,005	0,001	0,022	28
Sr ²⁺	0,06	0,039	0,059	0,009	0,254	0
Mn ²⁺	0,003	0,001	0,008	0,001	0,042	23
SiO ₂	8,96	8,59	2,37	4,74	14,08	0
Ca ²⁺	10,24	5,18	9,82	0,91	35,09	0
Mg ²⁺	1,61	1,27	1,24	0,03	5,09	0
Na ⁺	10,0	2,3	17,3	0,4	67,0	0
K ⁺	3,1	2,7	1,8	0,5	8,5	0
F ⁻	0,074	0,050	0,077	0,011	0,358	0
Cl ⁻	0,466	0,154	1,073	0,018	6,450	10
NO ₃ ⁻	1,12	0,27	2,02	0,02	9,00	11
PO ₄ ³⁻	0,15	0,05	0,29	0,05	1,40	32
SO ₄ ²⁻	1,00	0,23	2,22	0,03	10,01	10
HCO ₃ ⁻	58,3	47,4	40,9	5,9	154,4	0
CO ₃ ²⁻	3,8	0,5	9,9	0,5	50,8	27
pH	7,03	6,67	1,17	5,45	9,42	
Temp	27,00	26,20	3,20	22,70	38,00	
Dureza	34,50	19,50	31,70	5,00	135,00	
Condut.	116,00	84,40	43,30	25,40	342,00	

Tabela IV.2 - Médias, medianas, desvios-padrão, teores mínimos e máximos dos cátions e ânions (mg/L), e parâmetros físico-químicos (pH, temperatura em °C, dureza em mg/L de CaCO₃, e condutividade em uS/cm) das 38 amostras analisadas. Na coluna da direita está assinalado n = número de amostras abaixo do limite de detecção

A Tabela IV.3 apresenta a faixa de teores mais freqüentemente encontrada nas águas subterrâneas, segundo Davis & De Wiest (1966) e Matthess & Harvey (1982), e os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 1469 do Ministério da Saúde, de 29 de dezembro de 2000.

	Faixa freqüentemente encontrada (mg/L)	Teor máximo permitido (mg/L)
B ³⁺	0,01 – 1,0	
Ba ²⁺		0,7
Fe ²⁺	1,0 – 10,0	0,3
Li ⁺	0,001 – 0,5	
Mn ²⁺	0,2 – 1,0	
Sr ²⁺	0,01 – 1,0	
Zn ²⁺	<0,001 *	5
Ca ²⁺	10,0 – 100,0	
Mg ²⁺	1,0 – 40,0	
Na ⁺	1,0 – 20,0	200,0
K ⁺	1,0 – 5,0	
SiO ₂	5,0 – 40,0	
F ⁻	0,01 – 10,0	1,5
Cl ⁻	1,0 – 30,0	250,0
NO ₃ ⁻	0,1 – 10,0	44,2
PO ₄ ³⁻	0,1 – 0,01	
SO ₄ ²⁻	1,0 – 100,0	400,0
HCO ₃ ⁻	50,0 – 400,0	

Tabela IV.3 - Faixa de teores freqüentemente encontrada nas águas subterrâneas (Davis & De Wiest, 1966) e os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 1469 do Ministério da Saúde, de 29 de dezembro de 2000. * Matthew & Harvey (1982)

Para o conjunto de 38 amostras analisadas, os teores em cátions e ânions estão dentro ou abaixo da faixa de valores comumente encontrados nas águas subterrâneas. Para a totalidade dos íons e parâmetros analisados, as médias são sempre superiores às medianas, o que indica que, para cada íon ou parâmetro, a maior parte dos valores é mais baixa que a média, e que existem alguns poucos valores elevados. Mesmo considerando esses valores mais elevados, todas as amostras de água da região estudada são apropriadas para o consumo humano, visto que os teores de seus principais constituintes estão sempre bem abaixo dos teores máximos permitidos, de acordo com o padrão de potabilidade das águas, estabelecido pela Portaria 1469/2000 do Ministério da Saúde. Apenas o teor de ferro encontrado no poço 16 encontra-se um pouco acima do limite permitido. Esse teor não afeta a potabilidade dessa água, pois as concentrações máximas de ferro admissíveis nas águas destinadas ao consumo humano são determinadas apenas por características estéticas e organolépticas que esse íon confere à água.

2.1. Diagramas *Box & Whisker*

A composição das amostras pode ser caracterizada através dos diagramas *Box & Whisker*. Para cada variável, visualizam-se os valores

máximos e mínimos, as medianas e os valores abaixo dos quais encontram-se 25% e 75% das amostras.

A Figura IV.2a representa os diagramas para B^{3+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Mn^{2+} , Sr^{2+} e Zn^{2+} . A maioria das amostras apresenta, para esses íons, teores muito baixos. Observa-se que algumas amostras apresentam teores relativamente mais elevados para Fe^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} e Zn^{2+} .

Figura IV.2a - Diagrama Box & Whisker, representando os teores de B^{3+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Mn^{2+} , Sr^{2+} , Zn^{2+} para o conjunto de 38 amostras

A Figura IV.2b representa os diagramas para Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e SiO_2 . Nesses diagramas observa-se que Mg^{2+} , K^+ e SiO_2 apresentam na totalidade das amostras teores muito baixos. Ca^{2+} e Na^+ apresentam teores mais elevados em algumas amostras. Em vista desses dados, as águas do aquífero Botucatu, na região estudada, podem ser caracterizadas como águas pouco mineralizadas.

Figura IV.2b - Diagrama Box & Whisker, representando os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , Na^+ , K^+ para o conjunto de 38 amostras

A Figura IV.2c representa os diagramas para F^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , HCO_3^- e CO_3^{2-} . O ânion predominante é o bicarbonato. Os demais apresentam teores muito pouco elevados.

Figura IV.2c - Diagrama Box & Whisker, representando os teores de F^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , HCO_3^- e CO_3^{2-} para o conjunto de 38 amostras

A Figura IV.2d representa o diagrama para os valores de pH. A maioria das amostras apresenta valores de pH entre 6 e 8.

Figura IV.2d - Diagrama Box & Whisker, representando os valores de pH para o conjunto de 38 amostras

A Figura IV.2e representa o diagrama para os valores da temperatura. A maioria das amostras apresenta temperaturas entre 24 e 29 °C.

Figura IV.2e - Diagrama Box & Whisker, representando os valores de temperatura em °C para o conjunto de 38 amostras

A Figura IV.2f representa o diagrama para a dureza. A maioria das amostras apresenta valores de dureza entre 12 e 56 mg/L CaCO_3 .

Figura IV.2f - Diagrama Box & Whisker, representando os valores de dureza expressos em mg/L de CaCO_3 para o conjunto de 38 amostras

A Figura IV.2g apresenta o diagrama da condutividade das águas em $\mu\text{S}/\text{cm}$, corrigidos para 25 °C. Os valores de condutividades mais freqüentes estão na faixa de 37 a 174 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura IV.2g - Diagrama Box & Whisker, representando os valores da condutividade em uS/cm para o conjunto de 38 amostras

2.2. Histogramas de frequência

Os histogramas de frequência obtidos para B^{3+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , Li^{+} , Mn^{2+} , Sr^{2+} e Zn^{2+} encontram-se na Figura IV.3a. A distribuição dos teores é assimétrica para todos esses íons, estando a maior parte das amostras no intervalo mais baixo dos valores. Conforme já havia sido assinalado quando do comentário a respeito das médias e medianas, apenas algumas poucas amostras apresentam valores mais elevados.

A Figura IV.3b apresenta os histogramas de frequência obtidos para SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} e K^{+} . Para SiO_2 a distribuição é quase normal, com a média muito próxima da mediana, sendo que o intervalo de maior frequência está entre 8 e 10 mg/L. Para o Ca^{2+} observa-se a existência de 2 grupos: o primeiro, com a maioria das amostras, apresenta teores entre 0 e 10 mg/L e o segundo, teores entre 15 e 40 mg/L. A maioria das amostras apresenta teores de magnésio entre 0 e 2 mg/L. Para o sódio, a maior parte das amostras apresenta teores entre 0 e 10 mg/L. A distribuição dos teores de potássio é próxima da normal, com o intervalo de maior frequência entre 2 e 3 mg/L. Apenas 3 amostras estão fora dessa tendência, com valores entre 7 e 9 mg/L.

A Figura IV.3c apresenta os histogramas de frequência obtidos para os ânions F^{-} , Cl^{-} , NO_3^{-} , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} e HCO_3^{-} . Com exceção do HCO_3^{-} , os demais ânions apresentam distribuição bem assimétrica, com a maior parte dos teores no primeiro intervalo. O bicarbonato apresenta distribuição mais próxima da normal, sendo os intervalos de maior frequência os de 0-20, 20-40 e 80-100 mg/L.

Os histogramas de frequência dos valores de pH, temperatura (°C), dureza (mg/L de CaCO_3) e condutividade (uS/cm) encontram-se na Figura IV.3d. Em relação aos valores de pH, as amostras apresentam distribuição próxima da normal e dividem-se em dois grupos, o primeiro com pH entre 5 e 7 e o segundo entre 7,5 e 9,5. Quanto à temperatura, a maior parte das amostras apresenta valores entre 22 e 34 °C, com distribuição muito próxima da normal. Apenas uma amostra sai dessa tendência com valor de temperatura entre 38 e 40 °C. Para a dureza observa-se uma distribuição assimétrica dos valores, com a maior parte das amostras entre 0 e 20 mg/L. Duas amostras apresentam dureza mais elevada, entre 100 e 140 mg/L de CaCO_3 . A distribuição dos valores de condutividade mostra um grupo grande de amostras com condutividades entre 0 e 100 uS/cm e outro grupo importante de amostras com condutividades entre 150 e 200 uS/cm. Acima de 200 uS/cm há apenas 4 amostras.

Figura IV.3a - Histogramas de frequência dos teores obtidos para B^{3+} , Ba^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Li^{+} , Sr^{2+} , Mn^{2+} , em 38 amostras

Figura IV.3b - Histogramas de frequência dos teores obtidos para SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , em 38 amostras

Figura IV.3c - Histogramas de frequência dos teores obtidos para F^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , em 38 amostras

Figura IV.3d - Histogramas de freqüência dos valores obtidos para pH, temperatura, dureza e condutividade, em 38 amostras.

3 - COMPORTAMENTO ESPACIAL DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS, TEORES DOS ÍONS E RELAÇÕES IÔNICAS

3.1. Comportamento dos parâmetros físico-químicos

3.1.1. Temperatura

A Figura IV.4 representa o comportamento espacial das temperaturas das águas subterrâneas do aquífero Botucatu, dentro da área de estudo. A temperatura aumenta no sentido sudeste-noroeste, à medida que os poços passam a atingir profundidades cada vez maiores. Essa relação entre a profundidade e o aumento da temperatura já havia sido constatada por Teissedre & Barner (1981) em estudo realizado no aquífero Botucatu.

Figura IV . 4 – Comportamento espacial dos valores da temperatura em °C

3.1.2. pH

A Figura IV.5 apresenta o comportamento espacial do pH. As águas dos poços localizados na região de recarga do aquífero, na porção sudeste da área, apresentam pH ácido (5,54 - 6,16), com exceção dos poços 4, 20 e 25, localizados no extremo leste, na região de afloramento da Formação Pirambóia, que estão fora dessa tendência, com valores elevados de pH, entre 8,26 e 9,42.

Na região do aquífero Botucatu confinado pelo basalto, o pH torna-se cada vez mais alcalino no sentido sudeste-noroeste, aumentando no sentido geral do fluxo. Esse aumento ocorre provavelmente devido ao progressivo distanciamento da fonte de CO_2 (resultante da atividade biológica nos solos) e ao consumo do H^+ das águas da chuva, em reações de dissolução de feldspatos e calcita.

Figura IV. 5 – Comportamento espacial dos valores de pH

3.1.3. Condutividade

A Figura IV.6 ilustra o comportamento espacial da condutividade. Na porção livre do aquífero, as águas apresentam condutividades sempre inferiores a 100 uS/cm. Na porção confinada, as condutividades variam entre 130 e 318 uS/cm. Silva (1983), analisando o comportamento das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo, já havia indicado que a condutividade é mais elevada na porção confinada do aquífero e atribuiu essa característica à circulação mais lenta, e à contribuição de águas percoladas através das fraturas do basalto da Formação Serra Geral. Tal como acontece com o pH, os poços 4, 20 e 25 contrariam a tendência geral, apresentando condutividades elevadas.

Figura IV. 6 – Comportamento espacial dos valores de condutividades em uS/cm

3.1.4. Dureza

O comportamento espacial da dureza das águas estudadas encontra-se representado na Figura IV.7. Na região livre do aquífero as águas são brandas (dureza < 50 mg/L de CaCO_3). Os valores de dureza mais elevados são encontrados na região confinada do aquífero, onde a maioria das águas é pouco dura (dureza entre 50 e 100 mg/L de CaCO_3) e 2 amostras, encontradas na porção sudoeste da área, são duras (dureza > 100 mg/L de CaCO_3). No extremo noroeste da área, a dureza das águas cai para valores inferiores a 50 mg/L de CaCO_3 .

Figura IV. 7 – Comportamento espacial dos valores de dureza em mg/L de CaCO_3

3.2. Comportamento espacial dos íons maiores

3.2.1. Sódio

A Figura IV.8 apresenta o comportamento espacial dos teores de sódio. Os poços localizados na região de afloramento da Formação Botucatu apresentam baixos teores (0,4 a 2,6 mg/L). Os teores de sódio aumentam no sentido sudeste-noroeste, atingindo os teores mais elevados nos poços 5, 14 e 31, localizados a noroeste. Esse aumento ocorre devido à alta solubilidade do sódio e à facilidade com que este é liberado dos minerais silicosos, principalmente feldspatos, presentes nos basaltos. Os poços 4, 20 e 25, localizados na região de afloramento da Formação Pirambóia, contrariam a tendência geral, apresentando elevados teores de sódio.

Figura IV. 8 – Comportamento espacial dos teores de sódio em mg/L

3.2.2. Potássio

Na figura IV.9 pode-se observar o comportamento espacial dos teores de potássio. Na porção livre do aquífero, os teores de potássio variam entre 0,5 e 3,4 mg/L. Na porção confinada, no sentido sudeste-noroeste, ocorre inicialmente acréscimo de potássio que atinge teores de 8,5 mg/L, seguido de decréscimo para 0,5 mg/L, no extremo noroeste da área. Essa diminuição no sentido do fluxo pode estar relacionada ao fato de que o potássio, remobilizado por processos de intemperismo, vai sendo rapidamente adsorvido por argilominerais ou incorporado em minerais neoformados.

Figura IV. 9 – Comportamento espacial dos teores de potássio em mg/L

3.2.4. Magnésio

O comportamento espacial dos teores de magnésio está representado na Figura IV.11. Esse íon apresenta comportamento semelhante ao do cálcio, embora com menores concentrações. Na porção livre, os teores variam entre 0,81 e 1,68 mg/L. Na porção confinada, ocorre inicialmente acréscimo nos teores de magnésio, atingindo 5,09 mg/L, seguido de decréscimo para 0,03 mg/L, no extremo oeste da área. De acordo com Silva (1983), o magnésio das águas subterrâneas do aquífero Botucatu provém das águas de chuva e da dissolução dos piroxênios do basalto.

Figura IV. 11 – Comportamento espacial dos teores de magnésio em mg/L

3.2.5. Bicarbonato

A Figura IV. 12 ilustra o comportamento espacial dos teores de bicarbonato. O bicarbonato das águas subterrâneas provém do CO_2 resultante da atividade biológica nos solos, e da dissolução da calcita. Os teores de bicarbonato na porção livre variam entre 5,9 e 50,7 mg/L; na porção confinada, ocorre aumento, atingindo teores de até 154,0 mg/L no extremo noroeste da área. O aumento nas concentrações de bicarbonato é acompanhado pelo aumento nas concentrações do íon cálcio, exceto nos poços 5, 14 e 31, localizados na porção noroeste da área e nos poços 4, 20 e 25, localizados na área de afloramento da Formação Pirambóia. Esses poços apresentam teores elevados de bicarbonato e baixos teores de cálcio.

Figura IV. 12 – Comportamento espacial dos teores do bicarbonato em mg/L

3.2.6. Sulfato

A Figura IV.13 apresenta o comportamento espacial dos teores de sulfato nas águas estudadas. Os poços localizados na região de afloramento da Formação Botucatu apresentam baixos teores (0,06 a 0,45 mg/L). Na região confinada do aquífero, observa-se um pequeno aumento de sulfato no sentido sudeste-noroeste que atinge os valores mais elevados nos poços 5, 14 e 31, localizados na região noroeste da área (10,1, 1,75 e 4,78 mg/L, respectivamente). Os poços 4, 20 e 25, localizados na região de afloramento da Formação Pirambóia, também apresentam valores elevados de sulfato (1,35, 8,97, 2,17 mg/L, respectivamente).

Figura IV. 13 – Comportamento espacial dos teores de sulfato em mg/L

3.2.7. Cloreto

Na Figura IV. 14, pode-se observar o comportamento espacial dos teores de cloreto nas águas estudadas. A maioria das amostras apresenta teor de cloreto inferior a 1 mg/L. Teores maiores que 1 mg/L foram encontrados nos poços 5 (6,45 mg/L), 17 (1,36 mg/L), 25 (1,10 mg/L), 31 (1,41 mg/L) e 47 (1,40 mg/L). A alta solubilidade do cloreto e o longo tempo de permanência nas águas do aquífero resultam na concentração gradativa de seus teores ao longo do fluxo das águas subterrâneas, o que explicaria os teores mais altos dos poços 5 e 31. Nos poços 17 e 47, que estão na área de recarga do aquífero, os mais altos teores de Cl^- podem ter origem antrópica, relacionada com a agricultura.

Figura IV. 14 – Comportamento espacial dos teores de cloreto em mg/L

3.2.8. Nitrato

A Figura IV.15 apresenta a distribuição espacial dos teores de nitrato. A maioria das amostras apresenta teores muito baixos (< 1 mg/L). Teores mais elevados foram encontrados nos poços 5, (1,13 mg/L); 11, (2,45 mg/L), 17, (9,0 mg/L); 20, (1,45 mg/L); 22 (6,69 mg/L); 25 (3,23 mg/L); 26 (3,52 mg/L); 44 (6,29 mg/L); 47 (1,55 mg/L). Com exceção do poço 5, os demais estão na área de recarga do aquífero. Embora relativamente elevados em relação ao conjunto das amostras, esses teores de NO_3^- não comprometem a qualidade das águas. O fato de que os teores mais elevados de NO_3^- estão geralmente associados a teores um pouco mais elevados de Cl^- constitui um elemento a mais para a hipótese de contaminação relacionada à agricultura.

Figura IV. 15 – Comportamento espacial dos teores de nitrato em mg/L

3.3. Comportamento espacial das relações iônicas

A Tabela IV.4 mostra os teores dos principais íons em meq/L e as relações iônicas rK^+/rNa^+ , $rCl^-/rHCO_3^-$ e rSO_4^{2-}/rCl^- calculadas.

A tabela abaixo compara as variações dos valores das relações iônicas rK^+/rNa^+ , $rCl^-/rHCO_3^-$ e rSO_4^{2-}/rCl^- com o aumento da condutividade.

Condutividade US/cm	rK^+/rNa^+	$rCl^-/rHCO_3^-$	rSO_4^{2-}/rCl^-
0 - 50	0,63 – 3,33	0,003 – 0,397	0,05 – 1,90
50 - 100	0,6 – 2,52	0,001 – 0,3	0,04 – 3,28
100 - 150	0,35 – 0,49	0,001 – 0,01	0,34 – 3,98
150 - 200	0,02 – 1,17	0,001 – 0,029	0,25 – 8,58
> 200	0,004 – 0,9	0,001 – 0,072	1,15 – 14,84

Tabela IV.4 – Teores dos principais íons em meq/L, balanço iônico e relações iônicas

n° Amostra	Teores em meq/L										Balanço iônico					
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	Cátions	Ânions	% erro	rK ⁺ /rNa ⁺	rCl ⁻ /rHCO ₃ ⁻	rSO ₄ ²⁻ /rCl ⁻
1	1,044	0,100	0,679	0,061	0,003	0,005	0,002	0,041	1,632	0,103	1,883	1,787	2,632	0,090	0,003	7,945
2	1,163	0,225	0,244	0,069	0,002	0,003	0,001	0,007	1,531	0,103	1,700	1,646	1,609	0,284	0,002	2,567
4	0,200	0,053	1,914	0,013	0,002	0,003	0,001	0,028	1,836	0,183	2,179	2,053	2,987	0,007	0,002	9,580
5	0,122	0,002	2,915	0,013	0,008	0,182	0,018	0,208	2,531	1,223	3,052	4,170	-15,491	0,004	0,072	1,145
7	0,082	0,067	0,017	0,056	0,003	0,001	0,003	0,001	0,190	0,017	0,222	0,214	1,747	3,234	0,003	1,604
8	0,195	0,080	0,039	0,079	0,003	0,001	0,006	0,001	0,329	0,017	0,393	0,357	4,799	2,025	0,004	0,720
9	0,476	0,292	0,113	0,097	0,001	0,007	0,003	0,002	0,831	0,017	0,978	0,860	6,397	0,859	0,008	0,341
10	0,367	0,169	0,096	0,102	0,002	0,007	0,006	0,002	0,634	0,017	0,734	0,668	4,703	1,069	0,012	0,309
11	0,859	0,373	0,144	0,072	0,001	0,012	0,040	0,004	1,224	0,017	1,447	1,297	5,478	0,499	0,010	0,340
12	0,170	0,091	0,065	0,148	0,003	0,001	0,001	0,002	0,436	0,017	0,475	0,459	1,713	2,274	0,001	3,280
13	1,326	0,287	0,091	0,107	0,001	0,014	0,001	0,004	1,673	0,017	1,812	1,710	2,899	1,176	0,008	0,251
14	0,391	0,008	1,305	0,041	0,001	0,008	0,006	0,036	1,469	0,203	1,745	1,723	0,636	0,031	0,005	4,748
16	0,152	0,044	0,026	0,059	0,003	0,001	0,011	0,001	0,216	0,017	0,280	0,249	5,985	2,254	0,004	0,738
17	0,091	0,087	0,061	0,038	0,003	0,038	0,145	0,010	0,097	0,017	0,278	0,309	-5,342	0,630	0,397	0,250
19	1,751	0,419	0,113	0,105	0,006	0,002	0,001	0,007	2,204	0,163	2,388	2,383	0,099	0,927	0,001	4,647
20	0,045	0,012	2,915	0,026	0,018	0,013	0,023	0,187	1,060	1,693	2,998	2,994	0,061	0,009	0,012	14,843
21	0,086	0,036	0,035	0,061	0,002	0,001	0,004	0,002	0,179	0,017	0,219	0,204	3,506	1,764	0,006	1,898
22	0,068	0,058	0,074	0,028	0,003	0,026	0,101	0,001	0,108	0,017	0,228	0,256	-5,681	0,381	0,237	0,049
23	1,068	0,362	0,274	0,061	0,003	0,001	0,002	0,010	1,567	0,083	1,765	1,667	2,872	0,224	0,001	8,582
24	0,131	0,091	0,035	0,038	0,003	0,001	0,001	0,001	0,252	0,017	0,296	0,275	3,560	1,103	0,003	1,604
25	0,232	0,031	1,523	0,033	0,007	0,031	0,052	0,045	1,737	0,017	1,819	1,889	-1,902	0,022	0,018	1,456
26	0,074	0,086	0,026	0,087	0,002	0,008	0,057	0,005	0,197	0,017	0,272	0,286	-2,381	3,332	0,042	0,659
27	0,245	0,137	0,091	0,107	0,002	0,007	0,010	0,007	0,541	0,017	0,581	0,584	-0,243	1,176	0,013	0,955
28	0,369	0,095	0,074	0,187	0,006	0,001	0,015	0,002	0,721	0,017	0,725	0,763	-2,541	2,525	0,001	2,320
29	0,221	0,125	0,070	0,082	0,003	0,002	0,004	0,001	0,475	0,017	0,498	0,502	-0,498	1,176	0,004	0,527
31	0,298	0,022	1,436	0,020	0,019	0,040	0,009	0,100	1,377	0,367	1,777	1,911	-3,634	0,014	0,029	2,502
32	1,363	0,164	0,226	0,107	0,006	0,003	0,003	0,009	1,606	0,100	1,861	1,727	3,720	0,475	0,002	3,019
33	1,217	0,133	0,231	0,097	0,004	0,002	0,001	0,007	1,442	0,100	1,678	1,555	3,777	0,422	0,001	4,428
35	0,221	0,138	0,061	0,059	0,002	0,007	0,010	0,007	0,410	0,017	0,479	0,453	2,802	0,966	0,018	0,955
36	0,148	0,087	0,083	0,056	0,001	0,002	0,011	0,003	0,344	0,017	0,374	0,377	-0,405	0,681	0,005	1,757
37	1,099	0,124	0,235	0,084	0,009	0,006	0,001	0,025	1,311	0,017	1,543	1,369	5,968	0,359	0,005	3,977
38	1,172	0,213	0,566	0,102	0,001	0,001	0,001	0,007	1,606	0,017	2,052	1,633	11,386	0,181	0,001	6,409
40	0,941	0,160	0,174	0,067	0,003	0,001	0,005	0,003	1,213	0,017	1,341	1,242	3,862	0,382	0,001	2,460
42	1,217	0,210	0,257	0,069	0,001	0,014	0,003	0,009	1,524	0,017	1,752	1,568	5,555	0,269	0,009	0,640
44	0,316	0,109	0,100	0,217	0,007	0,004	0,101	0,001	0,721	0,017	0,743	0,851	-6,785	2,173	0,005	0,354
45	0,271	0,128	0,087	0,192	0,003	0,002	0,002	0,003	0,639	0,017	0,679	0,666	0,926	2,205	0,004	1,170
46	0,106	0,086	0,052	0,095	0,001	0,005	0,000	0,004	0,311	0,017	0,338	0,339	-0,115	1,813	0,017	0,750
47	0,124	0,115	0,070	0,046	0,003	0,039	0,025	0,001	0,131	0,017	0,355	0,216	24,201	0,662	0,301	0,037

3.3.1. rK^+/rNa^+

A relação rK^+/rNa^+ apresenta valores entre 0,004 e 3,33. Segundo Custódio & Llamas (1976), nas águas subterrâneas em geral a relação rK^+/rNa^+ apresenta valores menores que 1, devido principalmente à fixação de K^+ nos argilominerais. Na região estudada, os poços 7, 8, 10, 12, 13, 16, 21, 24, 26, 27, 28, 29, 44, 45 e 46 apresentam valores maiores que 1 para essa relação. Esses poços localizam-se na porção livre do aquífero Botucatu, e o alto teor de K^+ poderia estar relacionado à presença de potássio nos solos, proveniente das cinzas resultantes das queimadas da cana de açúcar que ocorrem na região. De modo geral, a razão rK^+/rNa^+ diminui com o aumento de condutividade, indicando que as águas mais salinas são também mais sódicas.

A Figura IV.16 apresenta o comportamento espacial dessa relação iônica. A relação rK^+/rNa^+ atinge os maiores valores na região de recarga do aquífero.

Figura IV. 16 – Comportamento espacial da relação iônica rK^+/rNa^+

3.3.2. $rCl^-/rHCO_3^-$

A relação $rCl^-/rHCO_3^-$ varia de 0,01 a 0,397, na faixa geralmente encontrada para águas continentais (Custodio & Llamas, 1976). De modo geral, os valores mais elevados ocorrem em águas com baixa condutividade (25 a 100 $\mu S/cm$). A Figura IV.17 apresenta o comportamento espacial dos valores dessa relação. Apenas 3 poços (17, 22 e 47) destacam-se com valores mais elevados, correspondendo à área de recarga do aquífero.

Figura IV. 17 – Comportamento espacial da relação iônica $rCl^-/rHCO_3^-$

3.3.3. $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$

A relação $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$ varia de 0,05 a 14,84. Essa relação iônica aumenta com a condutividade. Figura IV.18 apresenta o comportamento espacial dessa relação, indicando valores mais elevados nos poços 20, 23, 1, 4 e 38.

Figura IV. 18 – Comportamento espacial da relação iônica $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$

4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

4.1. Correlações

A Tabela IV.5a apresenta os coeficientes de correlação entre todas variáveis estudadas. Na Tabela IV.5b são agrupados três conjuntos de variáveis que apresentam entre si correlações positivas significativas. No primeiro conjunto estão condutividade, pH, Na^+ , Li^+ , F^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} e HCO_3^- ; no segundo, temperatura, dureza, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} e HCO_3^- e no terceiro, Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} . As variáveis de cada conjunto não apresentam correlações significativas com as variáveis dos outros conjuntos. É exceção o HCO_3^- , que apresenta correlação positiva significativa com algumas variáveis tanto do primeiro, como do segundo conjunto.

4.2. Análise fatorial

A análise fatorial modo R foi realizada para o conjunto de 38 amostras e 23 variáveis. A Tabela IV.6 mostra os autovalores e a porcentagem da variância total explicada por cada um dos 23 fatores.

Para prosseguir na análise fatorial, é necessário decidir sobre f , o número de fatores a serem considerados. A escolha do número de fatores foi baseada nos critérios propostos por Kaiser, 1960 (*in* STATISTICA FOR WINDOWS) e por Cattell, 1966 (*in* STATISTICA FOR WINDOWS), especificados no capítulo MATERIAIS E MÉTODOS. Na Tabela IV.6 pode-se observar que os 6 primeiros fatores apresentam autovalores maiores que 1 (critério de Kaiser, 1960 (*in* STATISTICA FOR WINDOWS)) e explicam 79,11% da variância total. No diagrama Fatores *versus* Autovalores (Figura IV.19), observa-se que a curva descendente muda de inflexão a partir do terceiro fator. Assim, baseado no critério proposto por Cattell, 1960 (*in* STATISTICA FOR WINDOWS), optou-se pelo modelo de três fatores. Esse modelo explica 60 % da variância total.

Tabela IV. 5a – Matriz de correlação entre as variáveis, calculadas a partir dos dados originais

	B	Ba	Ca	Fe	Li	Mg	Mn	Si	Sr	Zn	Na	K	F	Cl	NO ₃	PO ₄	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	pH	Temp.	Dureza	Cond.
B	1																						
Ba	-0,27	1																					
Ca	0,14	-0,16	1																				
Fe	0,03	0,11	0,07	1																			
Li	0,03	-0,33	-0,1	-0,07	1																		
Mg	0,2	0,01	0,72	0,03	-0,35	1																	
Mn	-0,13	0,14	-0,11	0,45	-0,09	-0,09	1																
Si	-0,13	-0,02	-0,05	0,02	0,09	0,1	-0,27	1															
Sr	0,37	-0,29	0,69	-0,03	0,09	0,58	-0,12	-0,23	1														
Zn	0,06	0,13	0,13	0,71	-0,13	0,24	0,51	0,1	0,11	1													
Na	0,25	-0,43	-0,17	-0,12	0,7	-0,4	-0,13	0,03	0,01	-0,16	1												
K	-0,31	0,38	0,19	-0,03	-0,34	0,28	-0,15	0,28	0	-0,03	-0,49	1											
F	0,28	-0,25	-0,08	-0,13	0,23	-0,32	-0,08	-0,1	-0,1	-0,07	0,59	-0,15	1										
Cl	-0,12	-0,18	-0,21	-0,04	0,59	-0,27	0,06	0,19	-0,19	-0,09	0,59	-0,37	0,27	1									
NO ₃	-0,08	0,11	-0,33	-0,07	-0,05	-0,19	0,5	-0,26	-0,26	0	-0,03	-0,03	0,06	0,2	1								
PO ₄	-0,07	0,06	-0,04	0,06	-0,12	0,1	-0,1	0,11	-0,11	-0,07	-0,17	-0,03	-0,11	-0,09	-0,15	1							
SO ₄	0,27	-0,36	-0,18	-0,09	0,69	-0,38	-0,09	0,12	-0,08	-0,13	0,91	-0,43	0,7	0,71	0	-0,13	1						
HCO ₃	0,15	-0,44	0,67	-0,04	0,44	0,32	-0,23	0,07	0,6	0	0,55	-0,13	0,24	0,34	-0,3	-0,15	0,45	1					
CO ₃	0,41	-0,27	-0,16	-0,09	0,61	-0,29	-0,09	0,12	-0,1	-0,09	0,85	-0,35	0,66	0,55	-0,02	-0,12	0,94	0,35	1				
pH	0,21	-0,51	0,41	-0,13	0,53	-0,02	-0,23	-0,07	0,41	-0,12	0,76	-0,26	0,53	0,31	-0,21	-0,19	0,65	0,85	0,57	1			
Temp.	-0,13	-0,25	0,53	-0,16	0,41	0,14	-0,19	-0,22	0,54	-0,25	0,07	0,15	-0,03	-0,09	-0,28	-0,12	-0,01	0,52	-0,1	0,45	1		
Dureza	0,23	-0,13	0,96	0,03	-0,14	0,82	-0,1	-0,07	0,76	0,18	-0,21	0,18	-0,1	-0,23	-0,3	-0,04	-0,21	0,62	-0,17	0,35	0,45	1	
Cond.	0,37	-0,46	0,47	-0,06	0,55	0,16	-0,19	0,03	0,46	-0,03	0,78	-0,26	0,48	0,39	-0,22	-0,18	0,71	0,89	0,7	0,91	0,36	0,44	1

Tabela IV.5b - Matriz representando apenas os íons que possuem correlações positivas entre si

	Cond.	pH	Li ⁺	Na ⁺	F	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Sr ²⁺	Temp.	Dureza	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺
Cond.	1,00	0,91	0,55	0,78	0,48	0,71	0,70	0,89								
pH	0,91	1,00	0,53	0,76	0,53	0,65	0,57	0,85								
Li ⁺	0,55	0,53	1,00	0,70	0,23	0,69	0,61	0,44								
Na ⁺	0,78	0,76	0,70	1,00	0,59	0,91	0,85	0,55								
F	0,48	0,53	0,23	0,59	1,00	0,70	0,66	0,24								
SO ₄ ²⁻	0,71	0,65	0,69	0,91	0,70	1,00	0,94	0,45								
CO ₃ ²⁻	0,55	0,53	0,61	0,85	0,66	0,94	1,00	0,57								
HCO ₃ ⁻	0,89	0,85	0,44	0,55	0,24	0,45	0,45	1,00	0,67	0,32	0,60	0,52	0,62			
Ca ²⁺								0,67	1,00	0,72	0,69	0,53	0,96			
Mg ²⁺								0,32	0,72	1,00	0,58	0,14	0,82			
Sr ²⁺								0,6	0,69	0,58	1,00	0,54	0,76			
Temp.								0,52	0,53	0,14	0,54	1,00	0,45			
Dureza								0,62	0,96	0,82	0,76	0,45	1,00			
Fe ²⁺														1,00	0,45	0,71
Mn ²⁺														0,45	1,00	0,51
Zn ²⁺														0,71	0,51	1,00

Fator	Autovalor	Autovalor acumulado	% variância total	% variância acumulada
1	6,728	6,728	29,25	29,25
2	4,803	11,531	20,88	50,14
3	2,271	13,802	9,87	60,01
4	1,672	15,474	7,27	67,28
5	1,519	16,994	6,61	73,89
6	1,202	18,196	5,23	79,11
7	0,990	19,186	4,30	83,42
8	0,862	20,048	3,75	87,17
9	0,691	20,739	3,00	90,17
10	0,574	21,313	2,49	92,66
11	0,340	21,653	1,48	94,14
12	0,332	21,985	1,44	95,58
13	0,301	22,286	1,30	96,88
14	0,225	22,511	0,97	97,85
15	0,188	22,699	0,87	98,72
16	0,096	22,795	0,41	99,13
17	0,076	22,871	0,32	99,45
18	0,058	22,929	0,25	99,70
19	0,046	22,975	0,20	99,90
20	0,013	22,988	0,05	99,95
21	0,008	22,996	0,03	99,99
22	0,003	22,999	0,01	100,00
23	0,001	23,000	0,00	100,00

Tabela IV.6 - Fatores extraídos da matriz de correlação e seus respectivos autovalores, junto com a proporção da variância explicada por cada fator

Figura IV. 19 - Diagrama representando os fatores e seus respectivos autovalores

No modelo de 3 fatores, foram calculadas as cargas para cada variável em cada um dos fatores (Tabela IV.8).

	Fator 1	Fator 2	Fator 3
B ³⁺	0,352	-0,143	0,255
Ba ²⁺	-0,563	0,103	0,028
Zn ²⁺	-0,159	-0,151	0,832
Fe ²⁺	-0,159	-0,043	0,747
Li ⁺	0,714	0,242	-0,068
Sr ²⁺	0,315	-0,790	0,100
Mn ²⁺	-0,233	0,184	0,744
SiO ₂	0,016	0,064	-0,172
Ca ²⁺	0,221	-0,911	0,086
Mg ²⁺	-0,114	-0,818	0,134
Na ⁺	0,895	0,362	0,030
K ⁺	-0,414	-0,309	-0,292
F ⁻	0,595	0,294	0,052
Cl ⁻	0,547	0,438	0,089
NO ₃ ⁻	-0,175	0,399	0,271
PO ₄ ³⁻	-0,195	-0,001	-0,127
SO ₄ ²⁻	0,866	0,431	0,070
HCO ₃ ⁻	0,784	-0,507	0,027
CO ₃ ²⁻	0,797	0,395	0,107
pH	0,899	-0,214	-0,022
Temp.	0,333	-0,531	-0,318
Dureza	0,185	-0,932	0,129
Condut.	0,931	-0,261	0,104
Autovalor	6,728	4,803	2,271
Proporção da Variância explicada	0,293	0,209	0,099

Tabela IV.7 - Cargas das variáveis no modelo de três fatores, sem rotação
Em negrito, variáveis que apresentam cargas elevadas

Após a rotação varimax, que maximiza a variância dos fatores, as cargas foram recalculadas, assim como as comunalidades (Tabela IV.8).

As comunalidades são calculadas pela soma dos quadrados dos pesos fatoriais em cada fator. O valor obtido representa a proporção da variância de cada variável que é explicada pelos fatores comuns. Assim, valores de comunalidade próximos de 1 indicam que a variável está sendo suficientemente bem representada pelo modelo de três fatores. Por outro lado, valores de comunalidade muito menores que 1 indicam que o modelo de três fatores não é suficiente para explicar a variância dessas variáveis. É o caso dos teores de B³⁺,

Ba^{2+} , SiO_2 , K^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , que apresentam comunalidades menores que 0,4, não estando, portanto, bem explicadas por esse modelo.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Comunalidades
B^{3+}	0,319	0,262	-0,197	0,209
Ba^{2+}	-0,498	-0,260	-0,110	0,328
Zn^{2+}	-0,100	0,170	-0,837	0,740
Fe^{2+}	-0,077	0,059	-0,759	0,585
Li^+	0,740	-0,027	0,153	0,572
Sr^{2+}	0,072	0,853	-0,018	0,733
Mn^{2+}	-0,079	-0,178	-0,777	0,642
SiO_2	0,014	-0,071	0,170	0,034
Ca^{2+}	-0,056	0,940	-0,010	0,887
Mg^{2+}	-0,339	0,757	-0,108	0,700
Na^+	0,960	-0,080	0,075	0,933
K^+	-0,518	0,148	0,247	0,352
F^-	0,658	-0,102	0,015	0,443
Cl^-	0,660	-0,250	-0,035	0,499
NO_3^-	-0,014	-0,408	-0,311	0,263
PO_4^{3-}	-0,199	-0,067	0,099	0,054
SO_4^{2-}	0,958	-0,151	0,028	0,941
HCO_3^-	0,592	0,715	0,105	0,872
CO_3^{2-}	0,885	-0,133	-0,016	0,802
pH	0,784	0,464	0,155	0,854
Temp.	0,118	0,575	0,386	0,494
Dureza	-0,091	0,953	-0,057	0,920
Conduct.	0,814	0,530	0,037	0,945
Autovalor	6,494	4,948	2,360	
Proporção da Variância explicada	0,282	0,215	0,103	

Tabela IV.8 - Cargas das variáveis no modelo de três fatores com rotação varimax
Em negrito, variáveis que apresentam cargas elevadas nos fatores
Na coluna da direita, valores de comunalidades

Assim, no modelo de três fatores com rotação varimax, o fator 1 explica 28,2% da variância total e é caracterizado por cargas positivas elevadas para pH, condutividade, Na^+ , Li^+ , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , F^- e Cl^- . O fator 2 explica 21,5% da variância total e é caracterizado por cargas positivas elevadas para Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , HCO_3^- e dureza. O fator 3 explica 10,3% da variância total e é caracterizado por cargas negativas elevadas para Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} .

As Figuras IV.20a e IV.20b representam os agrupamentos das variáveis em função de F1 *versus* F2 e F2 *versus* F3, respectivamente.

A análise fatorial, permitindo identificar 3 conjuntos de variáveis de comportamento semelhante, representou um refinamento da análise do comportamento das variáveis em relação ao que foi possível verificar apenas a partir da observação da tabela de correlações.

Figura IV.20a - Diagrama Fator 1 *versus* Fator 2

Figura IV.20b - Diagrama Fator 2 *versus* Fator 3

Prosseguindo a análise fatorial, foram calculados os *scores* para as amostras através do produto da matriz de dados originais pela matriz dos pesos

fatoriais (Tabela IV.10). Os *scores* dão uma medida da importância de cada fator na caracterização de cada amostra.

N. Poço	Fator 1	Fator 2	Fator 3	N. Poço	Fator 1	Fator 2	Fator 3
1	0,582	1,470	-0,072	24	-0,428	-0,695	0,186
2	-0,010	1,301	0,261	25	1,016	-0,305	-0,051
4	0,872	0,074	0,146	26	-0,646	-1,078	0,131
5	3,688	-0,928	0,300	27	-0,625	-0,586	0,308
7	-0,493	-0,842	0,146	28	-0,470	-0,351	0,823
8	-0,515	-0,652	0,153	29	-0,584	-0,564	0,532
9	-0,688	0,116	0,255	31	1,618	-0,388	0,216
10	-0,604	-0,263	0,338	32	-0,042	1,057	0,496
11	-0,322	0,923	-0,722	33	-0,328	0,688	0,412
12	-0,805	-0,599	0,710	35	-0,719	-0,634	0,526
13	-0,321	1,299	-0,965	36	-0,571	-0,804	0,255
14	1,090	0,324	1,098	37	0,109	0,774	0,520
16	-0,403	-0,647	-4,599	38	-0,056	1,174	0,386
17	-0,259	-1,378	-2,201	40	-0,114	0,669	0,382
19	0,007	2,793	-1,526	42	-0,117	1,023	0,482
20	3,253	-0,830	-0,431	44	-0,530	-0,412	0,481
21	-0,431	-0,913	0,445	45	-0,837	-0,232	0,882
22	-0,338	-1,211	-0,621	46	-0,645	-0,641	0,724
23	0,102	2,170	-0,133	47	-0,436	-0,905	-0,275

Tabela IV.9 - Valores dos *scores* calculados para as 38 amostras

Os *scores* das amostras foram representados em diagramas F1 *versus* F2 (Figura IV.21a) e F1 *versus* F3 (Figura IV.21b). O diagrama F1 *versus* F2 (Figura 22a) permite identificar 3 grupos de amostras:

Figura IV.21a – Diagrama Fator 1 x Fator 2

Grupo1 – Amostras com valores de F1 e F2 muito baixos, geralmente negativos ou próximos de zero: 7, 8, 9, 10, 12, 16, 17, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 29, 35, 36, 44, 45, 46 e 47. São águas muito diluídas, com baixos teores dos principais elementos analisados.

Grupo 2 – Amostras com valores de F1 próximos de zero e valores de F2 geralmente superiores a 1: 1, 2, 11, 13, 19, 23, 32, 33, 37, 38, 40, 42. São águas mais ricas em cálcio e bicarbonato, e empobrecidas em sódio e nos demais elementos de F1.

Grupo 3 – Amostras com altos valores de F1 e valores de F2 sempre inferiores a 1: 4, 5, 14, 20, 25, 31. São águas mais ricas em sódio, de pH elevado, e empobrecidas em cálcio e nos demais elementos de F2.

No diagrama F1 *versus* F3 (Figura IV.23b), destacam-se as amostras 16, 17 e 19 com valores de F3 muito negativos, indicando altos teores em Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} . Esses três elementos associados podem estar relacionados à abundância de concreções ferruginosas existentes nos solos percolados por essas águas. De fato, em condições mais redutoras, a goethita presente nos solos pode dissolver-se, sobretudo quando é mal cristalizada (Appelo & Postma, 1993).

Figura IV. 21b - Diagrama Fator 1 *versus* Fator 3

4.2.1. Comportamento espacial dos fatores

Foram elaborados mapas de isovalores dos fatores com a finalidade de representar o comportamento espacial das variáveis agrupadas. O mapa do Fator 1 (Fig. IV.22a) representa o comportamento conjunto de Na^+ , Li^+ , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , Cl^- , F^- , pH e condutividade. O mapa de isovalores do Fator 2 representado na Figura IV. 22b mostra a distribuição espacial do conjunto das variáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , HCO_3^- e dureza. Esses mapas têm a vantagem de sintetizar a informação, com relação aos mapas de isoteores tomados individualmente.

Os valores de F1 aumentam, de modo geral, para noroeste, no sentido do fluxo, indicando o progressivo enriquecimento em Na^+ e nos elementos a ele associados no fator 1. Assim, na área de recarga, os valores de F1 são baixos, atingindo até mesmo valores negativos, e vão se tornando mais elevados à medida em que se avança em direção às porções mais confinadas do aquífero. Fazem exceção a essa tendência os poços 4, 20 e 25, com altos valores de F1, situados no extremo leste, na região de afloramento da Formação Pirambóia (área de recarga).

Figura IV.22a – Distribuição espacial dos valores de Fator 1

Com relação a F2, há, de modo geral, um acréscimo no sentido do fluxo, seguido de um decréscimo na região noroeste da área. Assim, os poços localizados na porção livre do aquífero apresentam valores negativos de F2, que passam a ser positivos e crescentes nas regiões mais confinadas. No entanto, no extremo noroeste, onde os poços são mais profundos, atravessando a Formação Botucatu e atingindo a Formação Pirambóia, o fator 2 volta a diminuir.

4.3. Análise de agrupamento

Foi utilizada a análise de agrupamento modo Q para confirmar a identificação dos 3 grupos de amostras encontrados pela análise fatorial. Utilizaram-se inicialmente todos os íons analisados. O resultado dessa análise encontra-se na Figura IV.23a. Fica evidente a existência de 3 grupos, aproximadamente coincidentes com aqueles identificados pela análise fatorial. No entanto, 3 amostras (5, 19 e 20) aparecem muito distanciadas desses grupos. Observou-se que são justamente essas três amostras que apresentam os teores de HCO_3^- mais elevados no conjunto considerado. Como os teores em HCO_3^- não são distintivos em relação aos 2 grupos de águas mais concentradas (Grupo 2 e 3), já que todas as águas desses grupos são bastante bicarbonatadas, foi então realizada uma nova análise de agrupamento,

excluindo a variável HCO_3^- (Fig. IV.23b). Agora, os grupos identificados na análise de agrupamento coincidem exatamente com aqueles identificados na análise fatorial.

Figura IV. 23a- Dendrograma representando as amostras agrupadas na análise *cluster* considerando-se todos os íons analisados

Figura IV. 23b- Dendrograma representando as amostras agrupadas na análise *cluster* considerando-se todos os íons analisados, exceto HCO_3^-

4.4. Caracterização dos três grupos de águas identificados pela análise estatística

Na Tabela IV.10 os grupos identificados pela análise fatorial e pela análise de agrupamento estão caracterizados através de suas respectivas faixas de variação dos teores em meq/L de Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} e Cl^- , razões $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Na}^++r\text{K}^+$, valores médios de pH e condutividade, e teores médios em mg/L de Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} e Cl^-

O Grupo 1 é formado por 20 amostras e compreende o grupo das águas muito diluídas (condutividade < 100 uS/cm). Neste grupo, encontram-se águas cálcicas ($r\text{Ca}^{2+}/r\text{Na}^++r\text{K}^+ > 1$) e sódicas ($r\text{Ca}^{2+}/r\text{Na}^++r\text{K}^+ < 1$). Essas águas possuem pH variando entre 5,67 e 6,98 sendo, portanto, as águas mais ácidas encontradas. Quanto aos cátions, o teor médio de cálcio é de 3,92 mg/L, de sódio, 1,46 mg/L, de potássio, 3,59 mg/L, e de magnésio, 1,29 mg/L. Quanto aos ânions, o bicarbonato é o mais abundante, com teor médio de 23,68 mg/L, o teor médio de carbonato é praticamente nulo (0,5 mg/L), assim como os de cloreto (0,28 mg/L) e de sulfato (0,14 mg/L). De acordo com a classificação adotada por Schoeller (1962), observa-se que estas águas apresentam a seqüência de concentração dos íons maiores, descrita abaixo:

O Grupo 2 envolve 12 amostras e compreende as águas cálcicas, por apresentar a razão $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Na}^++r\text{K}^+$ sempre maior que 1. A condutividade nesse grupo varia de 130 a 250 uS/cm e o pH varia de 6,67 a 8,6. O teor médio de cálcio é de 23,74 mg/L, o de sódio é 6,19 mg/L, o de potássio, 3,26 mg/L e o de magnésio, 2,8 mg/L. O ânion mais abundante é o bicarbonato, com teor médio de 94,24 mg/L, seguido pelo carbonato (1,88 mg/L), sulfato (0,53 mg/L) e cloreto (0,18 mg/L). De acordo com a classificação adotada por Schoeller (1962), observa-se que as águas do Grupo 2 apresentam a seqüência de concentração dos íons maiores, descrita abaixo:

O Grupo 3 é formado por 6 amostras e compreende o grupo das águas sódicas, por apresentar a razão $rCa^{2+}/rNa^{+}+rK^{+}$ sempre menor que 1. Este grupo é constituído pelas águas mais condutoras (173,9 - 318 uS/cm) e pH sempre alcalino (8,25 - 9,42). O sódio apresenta teor médio de 46,0 mg/L, o cálcio, 4,3 mg/L, o potássio, 0,95 mg/L e o magnésio, 0,26 mg/L. Em relação aos ânions, o teor médio de bicarbonato é de 101,78 mg/L o de carbonato, 18,43 mg/L, o de cloreto 1,63 mg/L e o de sulfato, 4,83 mg/L. Segundo a classificação de Schoeller (1962), as águas pertencentes ao Grupo 3 apresentam para os íons maiores a seqüência descrita abaixo:

Com a finalidade de investigar a relação entre a composição das águas e a natureza das rochas percoladas, foram lançados sobre o mapa geológico os símbolos representativos dos 3 grupos de águas acima definidos (Fig. IV.24).

Tabela IV. 10 - Características dos grupos identificados pela análise fatorial e pela análise de agrupamento

Grupos	Nº de amostras	amostras	Teores em meq/L								
			rCa/rNa+rK	rNa ⁺	rCa ²⁺	rK ⁺	rMg ²⁺	rHCO ₃ ⁻	rCO ₃ ²⁻	rSO ₄ ²⁻	rCl ⁻
Grupo 1	20	7-8-9-10-12-16 17-29-21-22-24-26 27-28-35-36-44-45-46-47	0,7 - 2	0,01 - 0,11	0,06 - 0,47	0,03 - 0,21	< 0,29	0,09 - 0,83	< 0,017	< 0,04	< 0,03
Grupo 2	12	1-2-11-13-19-23 32-33-37-38-40-42	1,4 - 8,0	0,09 - 0,68	0,85 - 1,79	0,06 - 0,10	< 0,42	1,21 - 2,24	< 0,16	< 0,04	< 0,07
Grupo 3	6	4-5-14-20-25-31	0,02 - 0,29	1,3 - 2,9	0,04 - 0,39	0,01 - 0,21	< 0,12	0,43 - 2,53	< 1,69	0,02 - 0,2	< 0,182

Grupos	Valores médios		Teores médios em mg/L							
	pH	Conduz. (uS/cm)	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Grupo 1	6,07	48,79	1,46	3,92	3,59	1,29	23,68	0,5	0,14	0,28
Grupo 2	7,73	169,88	6,19	23,74	3,26	2,8	94,24	1,88	0,53	0,18
Grupo 3	8,82	234,25	46	4,3	0,95	0,26	101,78	18,43	4,83	1,63

CARTA GEOLÓGICA (IPT, 1981)

Figura IV.24 - Representação no mapa geológico dos 3 Grupos identificados pela análise estatística

O Grupo 1 (águas diluídas) ocorre na região de afloramento da Formação Botucatu, que é a área de recarga do aquífero, localizada na porção leste da área estudada. Essas águas são pouco mineralizadas, devido às características da Formação Botucatu, cujos sedimentos são constituídos essencialmente por quartzo e são quase desprovidos de argilominerais. Essa característica faz com que as águas que percolam esses sedimentos reflitam basicamente a composição das águas das chuvas. O pH ácido dessas águas tem origem no CO_2 da atmosfera e do solo. O equilíbrio $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ é representado pelas equações:

O Grupo 2 (águas cálcicas) ocorre na região confinada do aquífero Botucatu. Nessa região as águas atravessam as fraturas dos basaltos e tornam-se mais mineralizadas, enriquecendo-se principalmente em Ca^{2+} , proveniente dos plagioclásios e da calcita. Na região confinada do aquífero, o pH das águas apresenta-se mais elevado do que nas águas da região do aquífero livre. Isso ocorre devido ao distanciamento da fonte de CO_2 e ao consumo de H^+ , por reações tais como a hidrólise dos plagioclásios e da dissolução da calcita presente nos basaltos como mineral secundário (Silva, 1983).

O Grupo 3 (águas sódicas) ocorre na região de afloramento dos sedimentos da Formação Pirambóia (amostras 4, 20, 25) e na região noroeste da área (amostras 5, 14, 31). Essas águas apresentam as maiores concentrações de Na^+ , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , além de condutividades mais elevadas e pH alcalino, características que parecem representar uma assinatura geoquímica típica das águas que tiveram contato intenso com os sedimentos da Formação Pirambóia. Essa constatação é indicada pelo fato de que nos poços 4, 20 e 25 toda a extensão do filtro atravessa exclusivamente a Formação Pirambóia, e nos poços 5 e 14 os filtros, depois de atravessarem as Formações Serra Geral e Botucatu, atravessam uma boa espessura da

Formação Pirambóia. Mas é com relação ao poço 31 que essa constatação se faz mais evidente, pois esse poço situa-se muito próximo dos poços 32 e 33, todos no município de Sertãozinho, e apresenta água muito diferente dos outros dois: as águas dos poços 32 e 33, que provêm apenas da Formação Botucatu, são típicas do Grupo 2, enquanto que as águas do poço 31, que também atravessa uma boa espessura da Formação Pirambóia são completamente diferentes, tipicamente sódicas e pertencem ao Grupo 3.

5 - DIAGRAMAS DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS

Com a finalidade de facilitar a visualização da composição das águas dos três grupos considerados, foram construídos os diagramas mais comumente utilizados.

5.1. Diagramas de Stiff

Os diagramas de Stiff foram elaborados para as 38 amostras. Esses diagramas foram utilizados para facilitar a comparação entre as amostras dos diferentes grupos. As Figuras IV.25a, IV.25b e IV.25c apresentam os diagramas de Stiff construídos para as amostras dos Grupo 1, 2 e 3 , respectivamente.

5.2. Diagramas de Piper

As amostras dos três grupos identificados pela análise estatística foram projetadas no diagrama de Piper (Fig. IV.26). Segundo a classificação adotada por esse autor, as amostras do Grupo 1 ocupam o campo das águas bicarbonatadas cálcio-magnesianas, as do Grupo 2, o campo das bicarbonatadas cálcicas, e as do Grupo 3, o das bicarbonatadas sódicas.

Figura IV.25a.- Diagramas de Stiff construídos para as amostras do Grupo 1

Poço 1 - Monte Alto

Poço 2 - Guariba

Poço 11 - Santa Lúcia

Poço 13 - Dumont

Poço 19 - Matão

Poço 23 - Taquaritinga

Poço 32 - Sertãozinho

Poço 33 - Sertãozinho

Poço 37 - Barrinha

Poço 38 - Sales Oliveira

Poço 40 - Orlândia

Poço 42 - Pontal

Figura IV.25b - Diagramas de Stiff construídos para as amostras do Grupo 2

Figura IV.25c - Diagramas de Stiff construído para as amostras do Grupo 3

Figura IV.26 - Diagrama de Piper representando os três grupos identificados pela análise estatística

6 - CÁLCULO DOS EQUILÍBRIOS

6.1. Diagramas de estabilidade dos aluminossilicatos

As águas pluviais, ao percolarem os solos, dissolvem o CO_2 de origem biogênica tornando-se mais ácidas. O ataque ácido dessas águas aos silicatos resulta em dissolução incongruente, originando novos minerais e substâncias sólidas amorfas (Freeze & Cherry, 1979). A dissolução incongruente dos feldspatos potássicos e plagioclásios, que são os minerais mais abundantes da crosta, libera Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e H_4SiO_4 , e pode deixar como resíduo gibbsita, caulinita, montmorilonitas e minerais do grupo da sílica.

Os diagramas de equilíbrio dos sistemas $\text{Ca-Al-Si-H}_2\text{O}$, $\text{Na-Al-Si-H}_2\text{O}$, $\text{K-Al-Si-H}_2\text{O}$ permitem verificar com quais minerais primários e secundários as águas estão em equilíbrio. Os valores dos logaritmos das relações molares utilizados na construção dos diagramas encontram-se na Tabela IV. 11. As amostras pertencentes aos 3 grupos identificados na análise estatística foram representadas nesses diagramas.

	$\log (\text{Na}^+/\text{H}^+)$	$\log (\text{K}^+/\text{H}^+)$	$\log (\text{Ca}^{2+}/\text{H}^+)$	$\log (\text{H}_4\text{SiO}_4)$
1	4,94	3,90	12,94	-3,59
2	4,24	3,69	12,46	-3,63
4	5,54	3,37	12,52	-3,57
5	6,77	4,42	14,40	-3,30
7	0,93	1,44	6,99	-3,53
8	1,54	1,85	7,89	-3,52
9	2,17	2,11	8,62	-3,44
10	2,03	2,06	8,36	-3,46
11	2,83	2,52	9,97	-3,30
12	1,89	2,25	8,09	-3,41
13	2,75	2,82	10,40	-3,40
14	5,37	3,86	12,79	-3,68
16	1,47	1,82	7,98	-3,52
17	1,40	1,20	6,90	-3,77
19	3,69	3,66	12,22	-3,46
20	6,88	4,83	14,20	-3,51
21	1,70	1,95	7,96	-3,30
22	1,54	1,12	6,87	-3,71
23	4,48	3,83	12,81	-3,71
24	1,71	1,75	8,16	-3,51
25	6,27	4,61	14,24	-3,52
26	1,29	1,81	7,31	-3,42
27	2,38	2,45	8,93	-3,42
28	2,54	2,94	9,61	-3,31
29	2,51	2,58	9,38	-3,41
31	5,76	3,91	13,37	-3,62
32	4,05	3,73	12,23	-3,50
33	4,26	3,89	12,58	-3,51
35	1,74	1,73	7,96	-3,51
36	1,37	1,20	6,77	-3,47
37	4,19	3,75	12,38	-3,62
38	5,35	4,61	13,97	-3,54
40	4,35	3,93	12,89	-3,60
42	3,95	3,38	11,86	-3,42
44	2,98	3,32	10,16	-3,54
45	2,04	2,38	8,33	-3,52
46	1,83	2,09	7,94	-3,48
47	1,57	1,39	7,25	-3,72

Tabela IV. 11 - Valores dos logaritmos das relações molares utilizados na construção dos diagramas

Os três grupos apresentam teores de sílica aproximadamente iguais, sendo sua individualização evidenciada em termos das relações molares $[\text{Na}^+]/[\text{H}^+]$, $[\text{K}^+]/[\text{H}^+]$, $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{H}^+]$.

O sistema Na-Al-Si-H₂O (Fig. IV27a) é o que melhor individualiza os grupos. As amostras do Grupo 1 apresentam valores baixos para a relação molar $[\text{Na}^+]/[\text{H}^+]$. Essas amostras apresentam características de águas que percolam formações superficiais, encontrando-se em equilíbrio com a caulinita. As amostras do Grupo 2 apresentam valores para essa relação molar sensivelmente mais elevados, evidenciando uma evolução em direção ao campo das Na-montmorilonitas. As amostras do Grupo 3 apresentam os valores mais elevados para essa relação e encontram-se francamente em equilíbrio com as Na-montmorilonitas.

No sistema K-Al-Si-H₂O (Figura 27b) a maior parte das amostras está em equilíbrio com a caulinita. Em função do baixo teor de K, a maior parte das amostras é capaz de dissolver o K-feldspato.

No sistema Ca-Al-Si-H₂O (Figura 27c) apenas as águas do Grupo 1 são insaturadas com relação à Ca-montmorillonita. As demais encontram-se em equilíbrio com este mineral.

Fig. IV.27a - Diagrama de equilíbrio para o sistema Na-Al-Si-H₂O, com os três grupos de água

Fig. IV.27b - Diagrama de equilíbrio para o sistema K-Al-Si-H₂O, com os três grupos de água

Fig. IV.27c - Diagrama de equilíbrio para o sistema Ca-Al-Si-H₂O, com os três grupos de água

6.2. Cálculos dos índices de saturação

Os índices de saturação para calcita, dolomita, calcedônia, fluorita, magnesita e quartzo foram calculados através do programa MINTQA, a partir dos dados de pH, temperatura, e concentrações de CO_3^{2-} , F^- , SiO_2 , Mg^{2+} , Ca^{2+} , (Tabela IV.12).

Poço	calcita	dolomita	calcedônia	fluorita	magnesita	quartzo
1	0,017	-0,582	-0,157	-3,553	-1,234	0,296
2	-0,085	-0,682	-0,189	-3,223	-1,354	0,315
4	-0,435	-1,392	-0,063	-4,788	-1,452	0,418
5	0,391	-0,823	0,099	-3,776	-1,708	0,577
9	-2,524	-5,205	0,076	-5,131	-3,176	0,556
11	-1,565	-3,438	0,217	-5,046	-2,368	0,697
12	-3,237	-6,180	0,090	-4,402	-3,436	0,564
13	-1,110	-2,817	0,093	-4,573	-2,199	0,565
14	-0,070	-1,709	-0,202	-5,000	-2,099	0,222
16	-3,663	-7,837	0,025	-4,365	-4,672	0,517
17	-4,601	-9,170	-0,249	-4,168	-5,066	0,233
19	-0,036	-0,628	0,036	-2,817	-1,085	0,510
20	-0,075	-0,659	-0,080	-3,425	-1,082	0,411
21	-3,835	-8,000	0,223	-4,862	-4,662	0,708
22	-4,649	-9,327	-0,171	-4,718	-5,175	0,318
23	0,052	-0,284	-0,077	-3,588	-0,824	-0,313
24	-3,501	-7,108	0,012	-4,218	-4,103	0,495
25	0,372	-0,055	-0,072	-3,531	-0,922	0,407
26	-4,178	-8,255	0,122	-4,923	-4,575	0,612
27	-2,704	-5,624	0,121	-4,283	-3,417	0,610
28	-2,128	-4,788	0,211	-3,283	-3,156	0,692
29	-2,540	-5,286	0,128	-3,998	-3,243	0,615
31	-0,085	-1,609	-0,315	-4,897	-2,140	0,252
32	-0,176	-1,192	-0,031	-2,923	-1,504	0,433
35	-3,276	-6,696	-0,060	-4,358	-3,915	0,472
36	-4,056	-8,300	0,060	-5,291	-4,741	0,546
37	-0,211	-1,280	-0,174	-2,612	-1,552	0,284
38	0,618	0,578	-0,089	-4,601	-0,530	0,379
40	-0,052	-0,796	-0,121	-3,606	-1,235	0,348
42	-1,846	-4,080	-0,056	-3,327	-2,725	0,414
44	-0,401	-1,481	0,037	-4,248	-1,566	0,499
45	-2,812	-5,868	-0,051	-4,072	-3,543	0,412
46	-3,504	-7,021	-0,011	-5,211	-4,004	0,453
47	-4,259	-8,514	-0,174	-4,464	-4,572	0,316

Tabela IV. 12 - Índices de saturação para calcita, dolomita, calcedônia, fluorita, magnesita e quartzo, calculados através do programa MINTQA

Em relação ao quartzo, todas as amostras apresentam índices de saturação positivos e, em relação à calcedônia, os índices de saturação são muito próximos de zero ou positivos, indicando que as águas estão saturadas ou supersaturadas em relação a esses minerais.

Para a calcita, observa-se que as águas da porção livre do aquífero apresentam índices de saturação negativos, isto é, são capazes de dissolver a calcita. No sentido leste-oeste, os valores desses índices tornam-se cada vez mais elevados, atingindo valores positivos no extremo noroeste da área. Nos poços 5, 14 e 31, a noroeste, esse aumento nos índices de saturação é acompanhado por diminuição nos teores de cálcio, o que pode estar relacionado com a precipitação da calcita, conforme já havia sido observado por Silva (1983), em estudo realizado no aquífero Botucatu. Nos poços situados na área de afloramento da Formação Pirambóia (4, 20 e 24), a leste acontece fenômeno análogo: os índices de saturação de calcita estão próximos de zero e os teores de cálcio são baixos. Para a dolomita os índices são sempre negativos, assim como para a fluorita.

7. EVOLUÇÃO HIDROGEOQUÍMICA

Com o objetivo de melhor compreender a evolução química das águas estudadas ao longo do sentido geral fluxo do aquífero, foram elaborados três perfis SE-NW e um perfil E-W, representados na Figura IV. 24.

Ao longo do perfil A-A' (Fig. IV. 28a) estão representados os poços 17, 46, 9 e 14. Nota-se, através dos diagramas de Stiff, que as águas tornam-se mais mineralizadas no sentido SE-NW, sendo inicialmente cálcicas e, mais a NW, sódicas. Nesse mesmo sentido, os índices de saturação com relação à calcita passam de negativos a valores próximos de zero. Na região de Ribeirão Preto (poço 9) observa-se localmente uma inversão do fluxo, devida à intensa exploração das águas nessa cidade. A sequência de poços 17, 46 e 9 representa a evolução normal das águas ao longo do fluxo no sentido de aumento da salinidade e do índice de saturação da calcita. O poço 14, que atravessa a Formação Botucatu e atinge parte da Formação Pirambóia, apresenta características das águas do Grupo 3, mais sódicas e com índice de saturação da calcita próximo de zero.

No perfil B-B' (Fig. IV. 28b) estão representados os poços 22, 29, 24, 2 e 1. A evolução é semelhante à do perfil AA'. Aqui percebe-se com muita clareza a influência da Formação Pirambóia na composição das águas: no poço 2, que compreende apenas uma pequena porção da Formação Pirambóia, as águas

já se tornam um pouco mais sódicas em relação às águas do poço 24 (inteiramente na Formação Botucatu), mas só vão ser mais acentuadamente sódicas no poço 1, que abrange uma maior porção dessa Formação.

O perfil C-C' (Fig. IV. 28c) compreende os poços 20, 21, 27 e 19. Nesse perfil, há um poço na área de recarga do aquífero sobre a Formação Pirambóia que capta água exclusivamente dessa Formação (poço 20). As águas desse poço pertencem ao Grupo 3: são sódicas e apresentam índice de saturação da calcita próximo de zero. A partir do poço 21 até o poço 19, a evolução é no sentido de águas cada vez mais cálcicas e de índices de saturação que passam de valores muito negativos a valores próximos de zero, isto é, a evolução é de águas do Grupo 1 para águas do Grupo 2. O poço 27, que atravessa uma pequena parte da Formação Pirambóia, apresenta um discreto incremento no teor de sódio em relação aos poços vizinhos, bem evidenciado no diagrama de Stiff.

No perfil D-D' (Fig. IV. 28d) estão os poços 47, 45, 42 e 14. Nesse perfil, o fluxo é E-W, a salinidade aumenta gradualmente nesse sentido, assim como os índices de saturação da calcita. As águas passam do Grupo 1 para o Grupo 2 e, finalmente, para o Grupo 3.

Perfil A - A'

NW

SE

LEGENDA

- basalto Formação Serra Geral
- sill de diabásio
- arenito Formação Botucatu
- arenito Formação Pirambóia

Figura IV. 28a - Perfil sudeste-noroeste representando os poços 17, 46, 9 e 14

PERFIL B-B"

Figura IV. 28b - Perfil sudeste-noroeste representando os poços 22, 29, 24, 2 e 1,

PERFIL C - C'

Figura IV. 28c - Perfil sudeste-noroeste representando os poços 20, 21, 27 e 19

PERFIL D - D'

Figura IV. 28d - Perfil leste oeste representando os poços 45, 45, 42 e 14

V - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo permitiram caracterizar as águas do aquífero Botucatu, dentro dos limites da bacia hidrográfica Mogi-Pardo, determinando suas propriedades físico-químicas e composicionais, e as relações entre as águas e as rochas percoladas.

As águas subterrâneas na área de estudo possuem fluxo sudeste-noroeste, apresentando em geral, teores salinos muito baixos, decorrentes da constituição litológica das Formações Botucatu e Pirambóia. Apesar da baixa mineralização, observa-se que, durante o seu percurso subterrâneo, as águas sofrem modificações químicas e aumento dos teores de sais dissolvidos.

O comportamento hidroquímico dessas águas é determinado pelo confinamento do aquífero, pelos sentidos do fluxo, pelo tempo de residência das águas e pela composição química das rochas percoladas. Esses fatores propiciam aumento nos valores de pH e temperatura das águas, e um pequeno enriquecimento salino, desde a porção livre até a porção confinada do aquífero.

A análise estatística realizada permitiu dividir as águas do aquífero Botucatu, dentro da área de estudo, em três grupos com características físico-químicas e químicas distintas.

- O Grupo 1 engloba as águas mais diluídas (condutividades $< 100 \text{ uS/cm}$) e com pH entre 5,6 e 6,9, que ocorrem na região de afloramento da Formação Botucatu, área de recarga do aquífero. Essa região comporta-se como um sistema quimicamente aberto, onde a composição das águas subterrâneas é diretamente influenciada pelas precipitações. O cálculo do índice de saturação em relação à calcita mostra que essas águas são bastante insaturadas em relação a esse mineral.
- O Grupo 2 é formado por águas bicarbonatadas cálcicas, com condutividades entre 130 e 250 uS/cm e pH entre 6,6 e 8,6, que ocorrem na porção confinada do aquífero, em uma faixa de aproximadamente 60 km, a partir do contato da Formação Serra Geral com a Formação Botucatu. Nessa região o capeamento do basalto é pouco espesso e muito fraturado, propiciando uma alimentação indireta do aquífero Botucatu. As águas carregadas em CO_2 , ao percolarem o

basalto, provocam dissolução incongruente dos plagioclásios e piroxênios, enriquecendo as águas em cálcio (principalmente), magnésio, sódio, potássio, ferro, silício e bicarbonato. A maior parte das águas desse grupo é insaturada em relação à calcita. Observa-se, no entanto, que, em direção a oeste esse índice chega a valores próximos de zero ou até positivos.

- O Grupo 3 envolve as águas bicarbonatadas sódicas, com condutividades entre 173,9 e 318,0 uS/cm e pH entre 8,2 e 9,4, que ocorrem tanto na porção confinada do aquífero, no noroeste da área, como na região de afloramento da Formação Pirambóia no leste da área. A composição química dessas águas é bem diferente daquela dos outros dois grupos, apresentando teores mais elevados de sódio, cloreto, sulfato e bicarbonato, e baixos teores de cálcio. As águas desse grupo são ligeiramente insaturadas em relação à calcita, com exceção do poço 5, que é supersaturada em relação a esse mineral.

No setor leste da área estudada, que é a zona de alimentação do aquífero, a maior parte dos poços apresenta as águas pouco mineralizadas do Grupo 1, captadas dos sedimentos da Formação Botucatu, aflorantes ou recobertos por uma camada pouco espessa de basaltos. Apenas três poços (4, 20 e 25) nessa área têm suas águas provenientes dos sedimentos aflorantes da Formação Pirambóia, sendo caracterizadas por teores baixos de cálcio e mais elevados de sódio, o que as coloca no Grupo 3. As águas do Grupo 1, ao percolarem as rochas do aquífero no sentido do fluxo, dissolvem os minerais, enriquecendo-se em vários íons, principalmente HCO_3^- , Ca^{2+} e Na^+ , assumindo as características das águas do Grupo 2. A partir de um certo momento no seu percurso para oeste, os teores de Ca^{2+} começam a abaixar (poços 1 e 2), porém mantendo-se ainda superiores ao de Na^+ , que é o traço típico das águas do Grupo 2. Esses poços atravessam toda a espessura da Formação Botucatu e chegam a coletar água também de uma pequena porção da Formação Pirambóia. No extremo noroeste da área, onde a água é coletada tanto da Formação Botucatu como da Formação Pirambóia, a tendência de queda nos teores de Ca^{2+} e aumento nos teores de Na^+ é acentuada, resultando nas águas sódicas do Grupo 3 (poços 5, 14 e 31). Essa evolução sugere que teores mais elevados de sódio sejam ao mesmo tempo resultantes do enriquecimento normal em sais no sentido do fluxo e da influência de uma possível assinatura geoquímica das águas da Formação Pirambóia, a qual se expressa claramente

nas águas dos poços 4, 20 e 25 (Grupo 3), localizados na porção aflorante do aquífero, e discretamente nas águas dos poços 1 e 2 (Grupo 2), localizados a oeste.

Em relação à potabilidade, todas as águas estudadas são apropriadas para o consumo humano, pois apresentam todos os seus constituintes com teores abaixo dos limites permitidos, de acordo com o padrão estabelecido pela portaria 1469/2000 do Ministério da Saúde. As amostras provenientes dos poços 11, 17, 20, 22, 25, 26, 44 e 47, situadas numa área de maior vulnerabilidade do aquífero, que é a área de recarga, apresentam, ao mesmo tempo, teores mais elevados em Cl^- e NO_3^- , podendo indicar contaminação pelo uso de insumos agrícolas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPELO, C.A.J. & POSTMA, D. 1993. *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A.Balkema, Rotterdam. 536p
- ARAÚJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology Journal* 7:317-336.
- ASHLEY, R.P. & LLOYD, J.W. 1978. An example of the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation. *Journal of Hydrology* 39:355-364.
- BRIZ-KISHORE, B.H. & MURALI, G. 1992. Factor analysis for revealing hydrochemical characteristics of a watershed. *Environmental Geology Water Science* 19(1):3-9.
- CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. 1993. A composição faciológica das formações Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste paulista e a delimitação do contato entre as unidades. In: SIMPÓSIO DE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, Rio Claro, SP. *Boletim de Resumos Expandidos* I: 93.
- CAETANO-CHANG, M.R. 1993. Estado d'arte dos conhecimentos sedimentológicos/estratigráficos das Formações Pirambóia e Botucatu no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, Rio Claro, SP. *Boletim de Resumos Expandidos* I:84 - 85.
- CAETANO-CHANG, M.R. 1997. A Formação Pirambóia no Centro-Leste do Estado de São Paulo. Rio Claro, SP. IGCE-UNESP, 196 p. (Tese de Livre-Docência).
- CAMPOS, H.C.N.S. 1993. Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo IG-USP, 177p. (Tese de doutorado).

- CÉRON, J.C.; PULIDO-BOSCH, A.; BAKALOWICZ. 1999. Application of principal components analysis to the study of CO₂-rich thermomineral waters in the aquifer system of Alto Guadalentín (Spain). *Hydrological Sciences* **44**(6):929-942.
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, R. 1976. *Hidrología Subterranea*. Omega S/A, Barcelona.
- DAEE. 1974. Estudo de águas subterrâneas, região administrativa 6: Ribeirão Preto / São Paulo, 4v.
- DALTON, M.G. & UPCHURCH, S.B. 1978. Interpretation of hydrochemical facies by factor analysis. *Groundwater* **16**(4):228-233.
- DAVIS, S. N. & DEWIEST, R.J.M. 1966. *Hidrogeology*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 463 p.
- DAVIS, J. C. 1986 *Statistics and Data Analysis in Geology*, New York, Wiley, 646 p. (2ª edição).
- FREEZE, R. A & CHERRY, J. A. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 604 p.
- GALLO, G. & SINELLI, O. 1980. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas de Ribeirão Preto (SP). *Revista Brasileira de Geociências* **10**(2):129 - 140.
- GRANDE, J.A.; GONZÁLEZ, A.; BELTRÁN, R.; SÁNCHEZ-RODAS, D. 1996. Application of factor analysis to the study of contamination in the aquifer system of Ayamonte-Huelva (Spain). *Groundwater* **34**(1):155-161.
- GWW. 1995. – Groundwater for Windows, version 1.10; New York - UNITED NATIONS.
- HUIZAR, R.; MENDEZ, T; MADRID, R. 1998. Patterns of groundwater hydrochemistry in Apan-Tochac sub-basin, Mexico. *Hydrological Sciences* **43**(5):669-685.

- IPT 1981. Mapa geológico do Estado de São Paulo. São Paulo, v1. 125p (IPT. Monografias 6).
- KIMMELMANN, A.A., FOSTER, M., COELHO, R. 1994. Environmental isotope and hydrogeochemical investigation os Bauru and Botucatu aquifers, Paraná Basin, Brazil. Estudios de hidrogeología isotópica en América Latina, IAEA, Vienna, Tec. Doc. 835.
- MATOS, S.L.F. 1995. O contato entre o Grupo Passa Dois e a Formação Pirambóia na borda Leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. IG-USP, 110p. (Dissertação de Mestrado).
- MATTHESS, G. & HARVEY, J. C. 1982. *The properties of groundwater*. John Wiley & Sons Ltd, London. 406p.
- MINTEQA . 1991. – Equilibrium Metal Speciation Model, version 3.11 – U.S. ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY .
- PIPER, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transactions American Geophysical Union* **25**: 914 – 923.
- REBOUÇAS, A.C. - 1976 - Recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná: análise de pré-viabilidade. IG-USP, 143p. (Tese de Livre-docência).
- ROSS, J. L. S. & MOROZ, I. C. 1997. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo - Laboratório de Geomorfologia - FFLCH - USP / Laboratório de Cartografia Geotécnica - IPT / Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.
- SÁNCHEZ-MARTOS, F.; JIMENEZ-ESPINOSA, R.; PULIDO-BOSCH, A. 2001. Mapping groundwater quality variables using PCA and geostatistics: a case study of Bajo Anadarax, southeastern Spain. *Hydrological Sciences* **46**(2):227-242.
- SCHOELLER, H. 1962. Les eaux souterraines. Masson, Paris.

- SILVA, R. B. G. 1983. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. – IG-USP, 133p. (Tese de Doutorado).
- SILVA, R. B. G, DIOGO, A. & FRAIHA JR., S. 1982. Características hidroquímicas do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. *In*: 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Salvador, BA Anais ABAS: 410 – 416.
- SINELLI, O. & SOUZA, A. de. 1982. Estudo hidroquímico do ciclo hidrológico. *In*: 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Salvador, BA Anais ABAS: 317-333.
- SINELLI, O. 1979. Química das águas subterrâneas: aplicação às águas subterrâneas do Brasil Meridional. FFCL-USP, 130p. (Tese de Livre Docência).
- SOARES, P.C. - 1973. O Mesozóico Gondwânico no Estado de São Paulo. Rio Claro, SP. FFCL – Rio Claro/UNESP 153p. (Tese de Doutorado).
- SRACEK, O. & HIRATA, R. 2001. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani aquifer system in the state of São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal* (submitted).
- STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 1995. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. – Washington: American Public Health Association. (19th ed.).
- STATISTICA FOR WINDOWS. 1993. Release 4.3 - Slat Soft.
- SUK, H. & LEE, K-K 1999. Characterization of a groundwater hydrochemical system through multivariate analysis: clustering into groundwater zones. *Groundwater* **37**(3):358-366.
- STIFF, H.A. Jr. 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology* **3** (10):15 - 17.

- TEISSEDRE, J.M. & BARNER, U. 1981. Comportamento geotérmico e geoquímico das águas do aquífero Botucatu na Bacia do Paraná. *Revista Águas Subterrâneas* **4**: 85-95.
- USUNOFF, E.J. & GUZMAN-GUZMAN, A. 1989. Multivariate analysis in hydrochemistry: an example of the use of factor and correspondence analyses. *Groundwater* **27**(1):27-34.
- WU, F.T. & CAETANO-CHANG, M.R. 1992. Estudo mineralógico dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste do Estado de São Paulo. *Revista do Instituto Geológico* **13**(1):56-68.

ANEXO

Anexo 1 - Localização dos poços em UTM, cota do início e final do filtro, nível estático aparente, e a descrição litológica do poço

N. poço	Município	Coordenada x	Coordenada y	Unidade	Início do Filtro	Final do Filtro	Nível estático aparente	Topo	Base	Descrição litológica do poço
1	Monte Alto	138705	7649171	F. Serra Ger	347,00	452,00	470	0,00	60,00	Arenito avermelhado, mal selecionado fino a grosso argiloso
				F. Botucatu	452,00	568,00		60,00	452,00	Basalto cinza escuro vesicular
				F. Pirambóia	568,00	687,00		452,00	568,00	Arenito avermelhado fino a muito fino, bem selecionado, friável
								568,00	680,00	Arenito avermelhado parcialmente selec., fino a médio, argiloso
								680,00	709,00	Arenito e argilito quartzoso, mal selecionado, argila caulinitica
2	Guariba	165023	7634858	F. Serra Ger	199,00	208,00	480	0,00	24,00	Argila ocre, com matriz de decomposição de basalto
				F. Botucatu	208,00	230,00		24,00	208,00	Basalto semi-alterado
				F. Serra Ger	230,00	310,00		208,00	230,00	Arenito
				F. Botucatu	310,00	454,00		230,00	310,00	Basalto
				F. Serra Ger	454,00	462,00		310,00	362,00	Arenito avermelhado fino, bem selecionado, arredondado
				F. Botucatu	462,00	508,00		362,00	388,00	Arenito rosa claro muito fino a fino, bem selec., pouco arred.
				F. Serra Ger	508,00	514,00		388,00	400,00	Arenito rosa escuro fino a grosso
				F. Botucatu	514,00	536,00		400,00	454,00	Arenito argiloso rosa escuro fino a grosso, pouco arredondado
				F. Serra Ger	536,00	540,00		454,00	462,00	Diabásio
				F. Botucatu	540,00	570,00		462,00	508,00	Arenito rosa claro fino a grosso
				F. Serra Ger	570,00	580,00		508,00	514,00	Diabásio
				F. Pirambóia	580,00	600,00		514,00	536,00	Arenito rosa fino a grosso
								536,00	540,00	Diabásio
								540,00	570,00	Arenito rosa escuro fino a grosso
								570,00	580,00	Diabásio
								580,00	600,00	Arenito rosa claro argiloso
4	S ^a Cruz Esp	247776	7643855	F. Pirambóia	92,00	118,00	556	0,00	8,00	Solo de alteração marrom avermelhado
				F. Serra Ger	118,00	122,00		8,00	92,00	Diabásio
				F. Pirambóia	122,00	174,00		92,00	118,00	Arenito lilás fino, subarred., cimento calc. com calcita e qtzo
								118,00	122,00	Diabásio
								122,00	200,00	Arenito lilás fino, subangular, matriz siltica e cimento calcífero
5	Bebedouro	135924	7679952					200,00	202,00	Diabásio
				F. Serra Ger	611,00	724,00	583	0,00	22,00	Solo arenoso inconsolidado, amarelo acastanhado
				F. Botucatu	724,00	838,00		22,00	40,00	Arenito fino a médio, amarelado, subarred., bem selecion., friável
				F. Pirambóia	838,00	866,00		40,00	50,00	Arenito argiloso, marrom, médio, imaturo, mal selecionado
				F. Pirambóia	866,00	876,00		50,00	86,00	Argilito compacto marrom
				F. Pirambóia	876,00	950,00		86,00	122,00	Arenito fino, matriz argil., imaturo, mal selec., cimento carbon.
				F. Pirambóia	950,00	981,00		122,00	724,00	Basalto com níveis amigdaloidal e vesicular, muito fraturado
								724,00	804,00	Arenito fino a médio, amarelo/rosa, bem selec., arred., friável
								804,00	808,00	Arenito rosa médio a grosso, arred., mal selecionado, friável
								808,00	838,00	Arenito fino a médio róseo, bem selecionado, arred., friável
								838,00	846,00	Arenito esbranq., médio a grosso, arred., matriz argilosa, friável
								846,00	856,00	Arenito marrom, médio a grosso, mal selecionado
								856,00	866,00	Arenito esbranq., mal selecionado, com fragmentos de basalto
								866,00	870,00	Arenito esbranq., conclomerático, argiloso, mal selecionado
								870,00	872,00	Arenito esbranq., conciom., argiloso, mal selec., frag. de basalto
								872,00	876,00	Arenito esbranq., fino a grosso, mal selec., com frag. de basalto
								876,00	892,00	Arenito esbranquiado, arredondado, bem selecionado, friável
								892,00	932,00	Arenito marrom, médio a fino, argiloso, c/ frag. de argil. esbranq.
								932,00	950,00	Arenito marrom médio a fino, argiloso, c/ frag. de argil. esbranq.
								950,00	996,00	Arenito fino, amarel., bem selecion., arred. homogêneo, friável
								996,00	1020,00	Arenito fino a médio, amarelado, arredondado, homogêneo, friável

Continuação (anexo 1)

N. poço	Município	Coordenada x	Coordenada y	Unidade	Início do Filtro	Final do Filtro	Nível estático aparente	Topo	Base	Descrição litológica do poço
7	Ribeirão Pret	213180	7656060	F. Botucatu	112,00	196,00	460		?	
8	Ribeirão Pret	212530	7652690	F. Botucatu	137,00	228,00	455		?	
9	Ribeirão Pret	207410	7646310	F. Botucatu	111,00	239,00	450		?	
10	Ribeirão Pret	204903	7653707	F. Botucatu	?	?	455		?	
11	Santa Lúcia	180393	7597703	F. Botucatu	180,00	281,00	531	0,00	14,00	Arenito médio, marron escuro, bem selecion., sub-arred., friável
								14,00	34,00	Arenito médio a grosso, pouco selec., sub-arred., friável
								34,00	38,00	Arenito grosso, marron esverdeado friável
								38,00	48,00	Basalto semi-alterado cinza esverdeado
								48,00	80,00	Basalto cinza amigdaloidal
								80,00	94,00	Basalto semi-alterado
								94,00	148,00	Basalto preto semi-alterado
								148,00	156,00	Basalto semi-alterado cinza/marron, friável
								156,00	170,00	Arenito muto fino, bem selecionado com grãos arredondados
								170,00	174,00	Arenito branco muto fino, bem selec. com grãos arredondados
								174,00	230,00	Arenito avermelhado muto fino, bem selecionado
								230,00	258,00	Arenito averm., médio a grosso mal selec., com matriz argilosa
								258,00	262,00	Arenito avermelhado médio a grosso
								262,00	281,00	Arenito avermelhado, fino, bem selecionado arredondado, friável
12	Batatais	236626	7690688		?	?	614	0,00	6,00	Solo areno-argiloso
								6,00	100,50	Basalto amigdaloidal
								100,50	138,00	Arenito arroxeadado fino/grosso, mal selec., bem arredondado
13	Dumont	192063	7648726	F. Botucatu	?	?	600	0,00	12,00	Solo
								12,00	196,00	Basalto
								196,00	204,00	Arenito
14	Pitangueiras	16.5391	7612965	F. Serra Gera	380,00	492,00	480	0,00	492,00	Basalto
				F. Botucatu	492,00	565,00		492,00	565,00	Arenito muito fino a fino, bem selecionado
				F. Pirambóia	565,00	662,00		565,00	692,00	Arenito argiloso
16	S ^{ra} Rosa do V	255058	7617758						?	
17	São Simão	234753	7622491	F. Botucatu	82,00	176,00	628			
19	Matão	154582	7604500	F. Serra Gera	353,00	420,00	450	0,00	100,00	Arenito avermelhado, fino a grosso, mal selecionado, argiloso
				F. Botucatu	420,00	520,00		100,00	420,00	Basalto cinza escuro vesicular
				F. Pirambóia	520,00	568,00		420,00	520,00	Arenito avermelhado muto fino, bem selecionado
								520,00	622,00	Arenito avermelhado, pouco selecionado, argiloso / sills diabásio
20	Anelândia	224908	7551224	F. Pirambóia	109,00	120,00	750	0,00	6,00	Solo argilo-arenoso
				F. Pirambóia	120,00	130,00		6,00	12,00	arenito argiloso
				F. Pirambóia	130,00	150,00		12,00	20,00	arenito fino
				Sill de diabás	130,00	152,00		20,00	104,00	Diabásio
								104,00	120,00	Arenito branco
								120,00	130,00	Arenito siltoso
								130,00	150,00	Arenito branco com seixos
								150,00	155,00	Sill de diabásio

Continuação (anexo 1)

N. poço	Município	Coordenada x	Coordenada y	Unidade	Início do Filtro	Final do Filtro	Nível estático	Topo	Base	Descrição litológica do poço
										Sedimentos areno-argiloso
21	São Carlos	196751	7567194	F. Botucatu	179,00	221,00	729	0,00	35,00	Basalto cinza a preto, toleítico afanítico
21				F. Pirambóia	221,00	250,00		122,00	221,00	Arenito avermelhado, fino/médio, bem selecionado/arredondado
										Solo areno-argiloso avermelhado
22	Luis Antônio	220033	7613893	F. Botucatu	100,00	114,00	570	0,00	12,00	Argila vermelha com fargmentos de rocha alterada
22				F. Pirambóia	114,00	181,00		12,00	14,00	Rocha básica alterada avermelhada
								20,00	30,00	Areia fina bem arredondada, rosa amarelada
								30,00	44,00	Rocha básica cinza alterada com óxido de ferro
								44,00	114,00	Areia fina bem arredondada, rosa amarelada
								114,00	155,00	Areia fina a grossa, mal selecionada, rosa
								155,00	160,00	Areia grossa, mediamente selecionada
								160,00	183,00	Areia fina bem arredondada, rosa amarelada
								183,00	191,00	Areia argilosa, rosa
								0	61	Bauru
23	Taquaratinga	138691	7630086	F. Serra Ger	209,00	305,00	450	61	305	Serra Geral
				F. Botucatu	305,00	507,00		305	507	Botucatu
								507	565	Pirambóia
24	Pradópolis	179107	7634298	F. Botucatu	96,00	126,00	520	0,00	17,00	SEDIMENTO
25	Descalvado	229120	7576608	F. Pirambóia	496,00	595,00	644	17,00	19,00	BASALTO
								19,00	32,00	ARENITO
								32,00	48,00	BASALTO
								48,00	87,00	ARENITO
								87,00	184,00	BASALTO
								184,00	251,00	ARENITO
								0,00	22,00	Cenozóico
26	Ibaté	191512	7569082	F. Botucatu	130,20	180,80	652	22,00	54,00	Serra Geral
				F. Pirambóia	180,80	215,15		54,00	246,00	Botucatu
								246,00	350,00	Pirambóia
								0,00	21,80	Arenito avermelhado, argiloso com basalto na base
27	Américo Bras	180119	7588483		130,00	181,00	550	21,80	80,80	Basalto
								80,80	180,80	Arenito
								180,80	217,80	Arenito argiloso
28	Gavião Peix	139217	7580882	F. Botucatu	195,00	279,00	639			
29	Guatapar	185208	761959	F. Botucatu	?	?	530	0,00	9,80	Solo de Basalto
31	Sertãozinho	188106	7659583	F. Botucatu	148,00	247,00	458	9,80	141,00	Basalto vesicular/amigdaloidal
				F. Pirambóia	247,00	291,00		141,00	247,00	Arenito avermelhado, subarredondado, seleção regular
								247,00	302,00	Arenito arroxeadado passando a bege, seleção regular
								302,00	303,00	Diabásio
								0,00	191,00	Basalto cinza escuro vesicular/amigdaloidal
32	Sertãozinho	190550	7658755	F. Botucatu	212,00	372,00	460	191,00	402,00	Arenito avermelhado, fino/médio, mal selec., levemente carbon.
								402,00	408,00	Sili de diabásio cinza escuro
								0,00	5,00	Solo avermelhado
33	Sertãozinho	190522	7661056	F. Botucatu	130,00	313,00	461	5,00	116,50	Basalto
								116,50	319,50	Arenito fino a médio bem selecionado, com passagens argilosas

Continuação (anexo 1)

N. poço	Município	Coordenada x	Coordenada y	Unidade	Início do Filtro	Final do Filtro	Nível estático	Topo	Base	Descrição litológica do poço
35	Serrana	229628	7653176	?	111,00	233,00	525	0,00	4,00	Solo avermelhado areno-argiloso
								4,00	32,00	Arenito fino a médio, argiloso avermelhado, mal selecionado
								32,00	47,00	Diabásio cinza escuro a esverdeado
								47,00	200,00	Arenito bege, muito fino a médio pouco argiloso
								200,00	218,00	Arenito argiloso bege claro compacto
								218,00	244,00	Arenito silteoso bege compacto
								244,00	248,00	Siltito bege compacto
36	Serra Azul	234600	7641850		115,00	207,00	556	0,00	18,00	Arenito médio a fino a argiloso marrom claro
								18,00	42,00	Diabásio
								42,00	56,00	Arenito médio a fino róseo
								56,00	210,00	Arenito róseo, médio/fino, friável, grãos subarredondado
37	Barrinha	173052	7653332	F. Botucatu			490		?	?
38	Sales Oliveira	202529	7704946	F. Botucatu	355,00	516,00	684	0,00	34,00	Arenito fino a médio argiloso
								34,00	40,00	Saprólito argiloso
								40,00	314,00	Basalto amigdaloidal, localmente fraturado
								314,00	315,00	Intertraps arenoso argiloso
								315,00	318,00	Basalto alterado
								318,00	460,00	Arenito averm., fino a médio, bem selecion., localmente conglom.
								460,00	554,00	Arenito avermelhado, seleção regular, localmente conglomerático
40	Oriândia	199994	7706229	F. Botucatu	206,00	350,00	650	0,00	2,00	Colúvio
				F. Pirambóia	350,00	374,00		2,00	13,00	Solo de alteração de basalto
								13,00	60,00	Basalto
42	Pontal	184564	7671155	F. Botucatu	178,00	163,00	482	0,00	10,00	Solo eluvial argiloso avermelhado
				F. Serra Gera	163,00	185,00		10,00	154,00	Basalto medianamente fraturado
				F. Botucatu	185,00	247,00		154,00	163,00	Intertrap aren. fino, bem selec., matriz carbon. e cimento ferrug.
								163,00	185,00	Basalto
								185,00	250,00	Arenito bem selecionado arredondado, matriz carbonática
44	Jardinópolis	212136	7673763	F. Botucatu	179,00	276,00	502	0,00	19,00	Latossolo vermelho escuro (alteração da Formação Serra Geral)
								19,00	110,00	Basalto cinza escuro
45	Brodowsk	223850	7675300	F. Botucatu			542	0,00	2,00	Cobertura coluvionar
								2,00	22,00	Arenito fino avermelhado com seixos esparsos de quartzo
								22,00	256,00	Basalto
								256,00	262,00	Intertrape arenito fino/médio castanho avermelhado
								262,00	287,00	Basalto
46	Cravinhos	216750	7638400		405,00	496,00	574	0,00	16,00	Solo argiloso avermelhado
								16,00	394,00	Basalto afanítico preto amigdaloidal
								394,00	496,00	Arenito marrom fino a médio, bem arredondado
47	Altinópolis	252054	7612289		?		700	?		